

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Факультет инженерно-физический
Кафедра физики
Направление подготовки 03.03.02 – Физика


ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Зав. кафедрой

 Е.В. Стукова
«26» июня 2023 г.

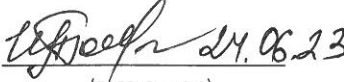
БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему: Модификация гибридных энергетических установок на основе солнечных панелей


Исполнитель
студент группы 911-об

 23.06.23 К.А. Рябицкий
(подпись, дата)

Руководитель
доцент, канд. физ.-мат. наук

 24.06.23 И.А. Голубева
(подпись, дата)

Нормоконтроль
доцент, канд. физ.-мат. наук

 26.06.23 О.В. Зотова
(подпись, дата)

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)


Факультет инженерно-физический

Кафедра физики

Направление подготовки 03.03.02 – Физика

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой

 Е.В. Стукова
«20» апреля 2023 г.

ЗАДАНИЕ

К выпускной квалификационной работе студента Рябицкого Кирилла Александровича

1. Тема бакалаврской работы: Модификации гибридных энергетических установок на основе солнечных панелей.

(утверждена приказом от 20.04.2023 № 951-уч)

2. Срок сдачи студентом законченной дипломной работы: 23.06.2023 г.

3. Исходные данные к дипломной работе: альтернативные источники энергии, динамическая установка солнечных панелей, программное обеспечение работы установки.


4. Содержание дипломной работы (перечень подлежащих разработке вопросов): провести анализ существующих мобильных источников энергии, выявить преимущества и недостатки технологий, лежащих в основе их работы; автоматизировать отбор оптимального состава гибридного источника энергии для конкретной географической точки; обосновать эффективность динамической установки солнечного модуля по сравнению со стационарными панелями.

5. Перечень материалов приложения: (наличие чертежей, таблиц, графиков, схем, программных продуктов, иллюстративного материала и т.п) нет.

6. Дата выдачи задания: 20.04.2023 г.

Руководитель дипломной работы: Голубева Ирина Анатольевна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики.

Задание принял к исполнению (дата): 20.04.2023


(подпись студента)

РЕФЕРАТ

Бакалаврская работа содержит 58 с., 22 рисунка, 5 таблиц, 10 источников.

ГИБРИДНАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА, АВТОНОМНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ, СОЛНЕЧНЫЙ ТРЕКЕР, ДЕГРАДАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ СОЛНЕЧНОЙ ПАНЕЛИ, АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Целью данной работы является обоснование эффективности модификаций для гибридных источников энергии, позволяющих повысить выработку электроэнергии, а также эффективнее использовать ресурсы.

В ходе бакалаврской работы был проведен анализ существующих мобильных источников энергии, а также выявлены преимущества и недостатки технологий, лежащих в основе их работы. Было разработано программное обеспечение, использующее математические модели, для подсчёта энергетического потенциала и определения оптимального состава гибридной энергетической установки в конкретной географической точке. Разработанный алгоритм, реализованный в программном обеспечении, позволяет использовать принципы динамического программирования для фильтрации вариантов сразу по нескольким параметрам.

При помощи сравнения расчётов мощности для стационарной и динамической панели, было доказано, что использование солнечных трекеров позволяет повысить выработку электроэнергии. При расчётах мощности учитывалось падение напряжения в следствии повышенного нагрева панели от постоянного нахождения под прямыми солнечными лучами.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	6
1 Анализ современного состояния систем электроснабжения	9
1.1 Дизельные электростанции	9
1.2 Солнечные электростанции	11
1.3 Гидроэлектростанции	12
1.4 Ветряные электростанции	12
1.5 Гибридные переносные установки	13
1.6 Водородно-кислородные топливные элементы	16
2 Расчёт оптимального состава гибридных источников электроэнергии	20
2.1 Обзор математических моделей для выработки энергии у возобновляемых источников энергии	23
2.2 Архитектура приложения	29
2.3 Описание работы алгоритма отбора оптимальной комплектации	32
3 Использование трекеров для динамической установки солнечного модуля	40
4 Расчёт деградации характеристик солнечного элемента при динамической установке	45
4.1 Связь температуры солнечного модуля и вольт-амперной характеристики	45
4.2 Расчет выходной мощности для статичной и подвижной панели	51
Заключение	56
Библиографический список	57

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

- АКБ – аккумуляторная батарея;
- ВИЭ – возобновляемые источники энергии;
- ВЭУ - ветроэнергетическая установка;
- ГИЭ – гибридные источники энергии;
- ГЭС – гидроэлектростанция;
- ДЭС – дизельная электростанция;
- ДЭУ – дизельная электроустановка;
- ИЭЭ – источник электроэнергии;
- КПД – коэффициент полезного действия;
- ЛЭП – линия электропередач;
- РФ – Российская Федерация;
- США – Соединённые Штаты Америки;
- СЭУ – солнечная электроустановка;
- ТЭЦ – теплоэлектроцентраль;
- ФЭС – фотоэлектростанция.

ВВЕДЕНИЕ

Электроэнергия является одним из важных требований любой страны, так как она оказывает существенное влияние на социально-экономическое развитие стран. До настоящего времени значительная часть спроса на энергию сильно зависела от ископаемого топлива, такого как природный газ, уголь и так далее. Данные источники энергии имеют ограниченный запас и добыча сгораемого топлива ограничено территориально, что делает доставку традиционного топлива в отдаленные районы экономически не выгодным. К тому же, использование ископаемых источников энергии путем сгорания приводит к разрушающим последствиям для окружающей среды.

Нередко возникает необходимость использования электроэнергии за пределами зоны доступности ЛЭП или стационарных источников электроэнергии. Решением данной проблемы является использование мобильных источников энергии. На инженеров России возлагаются наиболее сложные задачи полевого электроснабжения, требующие специальной подготовки и применения ИЭЭ большой мощности. Например, для выполнения задачи «Полевое электроснабжение войск» от инженерных войск РФ задействовано 585 электростанций, из них 276 силовых и 309 осветительных. На данный момент в большинстве случаев применяются дизельные электростанции, которые преобразуют энергию сгорания топлива в электрическую. Ключевое слово и главный недостаток – топливо, ДЭС требуют наличия и постоянной дозаправки пожароопасного горючего. Вместе с тем, в данных источниках электроэнергии практически исчерпаны возможности повышения их тактико-технических характеристик по надежности, уровням шума, экономичности, экологическим и массогабаритным показателям. К тому же, по причине постоянных не рассчитанных затрат энергии, возможно преждевременное истощение топливных ресурсов и, как следствие, перебойная работа электроустановок, снижение боеготовности, слепота радаров, отсутствие связи с центром управления и т.д. Все эти последствия ставят жесткую необходимость в нали-

чии альтернативного источника энергии, не зависящего от труднодоступного топлива. Перед учеными стоит задача по созданию источников электричества с использованием нетрадиционных способов генерирования энергии с улучшенными характеристиками по сравнению с традиционными источниками энергии.

Альтернативные источники энергии не имеют выше перечисленных недостатков, однако выработка электроэнергии полностью зависит от климатических параметров в конкретный момент времени. Учитывая скачкообразный и не постоянный характер изменения погодных условий, использование не традиционных источников энергии в качестве автономного самостоятельного источника питания нагрузки – невозможно.

Учитывая вышесказанное, наибольший интерес представляют собой гибридные источники электроэнергии, которые имеют большой потенциал для дальнейшего совершенствования и сокращают использование ископаемого топлива. Перспективной областью применения ВИЭ в России являются, как и военные объекты так и изолированные гражданские и удаленные районы, а также резервирование системы электроснабжения особо ответственных потребителей (повышенной категории надежности). В России на данный момент широкое применение альтернативных источников энергии найдено даже в технических средствах организации дорожного движения, где обеспечивается питание светофоров с потребляемой мощностью до 0,15 кВт в сутки. Данный факт подтверждает большую распространённость и использование возобновляемых источников энергии [1]. Несмотря на актуальность данной проблемы, гибридные источники энергии имеют незначительные модификации и отличаются только мощностью входящих в состав агрегатов.

Таким образом, целью данной работы является обоснование эффективности модификации для ГИЭ, позволяющей повысить выработку электроэнергии, а также эффективнее использовать ресурсы.

Для достижения данной цели необходимо осуществить следующий задачи:

- 1) провести анализ существующих мобильных источников энергии, выявить преимущества и недостатки технологий, лежащих в основе их работы;
- 2) автоматизировать отбор оптимального состава гибридного источника энергии для конкретной географической точки;
- 3) обосновать эффективность динамической установки солнечного модуля по сравнению со стационарными панелями.

1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

1.1 Дизельные электростанции

В настоящий момент в Российской Федерации основную часть среди мобильных электрогенераторов составляют дизельные электростанции. Например, на рисунке 1 представлен Азимут АД 500-Т400.



Рисунок 1 – Электрогенератор Азимут АД 500-Т400

Данные установки присутствуют в различных модификациях и могут вырабатывать мощность от 10 до 500 кВт. На рисунке 1 представлена самая мощная модификация на 500 кВт. Она имеет напряжение в 400 В и номинальный ток в 904 А. Имея максимальный заправленный бак в 1100 литров и работая на средней мощности, данная установка проживет без дозаправки 23 часа 52 минуты, при мощности 75 % от максимальной время автономной работы составил 8 часов 45 минут.

Данные характеристики заявлены для новых установок. В реальных условиях продолжительность работы без дозаправки меньше на порядок износа генератора. В то же время размеры данного агрегата составляют 4х1,5х2 метра, масса составляет 7 тонн. К тому же имеет температурное ограничение в минус 10 °С, что ограничивает использование установок подобного типа на территориях с низкими годовыми температурами. ДЭС относится к электро-механическим генераторам. Принцип работы электро-механических генерато-

ров заключается в преобразовании механической энергии в электрическую. Согласно закону Фарадея, описывающего электромагнитную индукцию, изменение потока магнитной индукции через проводник, вызывает электродвижущую силу [2].

Для изменения потока магнитного поля можно использовать, закрепленные на валу, и вращающиеся вместе с валом, магниты внутри намотанных на статор и неподвижных проводников (в случае доступа дополнительного источника тока, есть возможность вместо постоянных магнитов использовать проводники с током, потому что каждый проводник с током создает магнитное поле). По этому принципу устроенные электромеханические генераторы. Отличие составляет лишь механические силы, вращающие ротор с магнитами. В качестве источника механических сил в ДЭС используется энергия сжатых газов.

Главным недостатком электромеханических генераторов является относительно низкий КПД (от 20 % до 30 %), зависимость от дополнительного источника энергии для вращения ротора. Из положительных качеств можно отметить: простоту в обслуживании, относительно недорогое производство. На рисунке 2 представлена общая схема работы электромеханических генераторов.

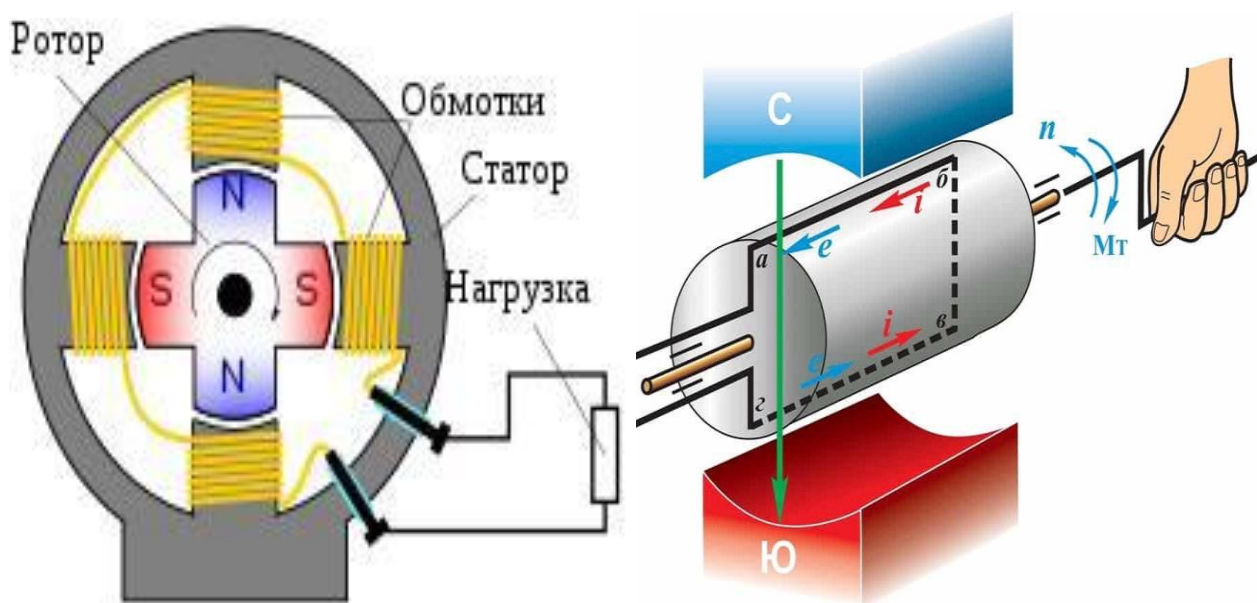


Рисунок 2 - Общая схема работы электромеханических генераторов

1.2 Солнечные электростанции

Основу ФЭС составляют фотоэлементы – системы, преобразующие энергию фотонов в электрическую. Фотоны обладают корпускулярно-волновым дуализмом. Свойства частиц проявляются при передаче импульса во время столкновения фотонов с атомами других веществ. Фотоны, попадая на полупроводниковый материал, передают валентным электронам свой импульс. Так как электроны на внешней оболочке обладают минимальной силой притяжения к ядру, полученного импульса достаточно для преодоления потенциального барьера, после отрыва от ядра электроны начинают движение по материалу. По этой причине и создается направленное движение электронов. Существенный недостаток данного метода заключается в прямой зависимости от погодных условий и низкий КПД относительно традиционных источников энергии на сгораемом топливе, что делает невозможным использование технологии как основного источника энергии. Увеличение площади поверхности подобных панелей может являться лишь частичным решением данной проблемы, по причине дороговизны производства, относительной хрупкости материала и достаточно большой площади, которую необходимо покрыть панелями. Из плюсов данной технологии можно отметить отсутствие двигающихся деталей, что приводит к повышенному сроку службы, неограниченность ресурса и простая эксплуатация. На рисунке 3 показана схема действия ФЭС в упрощенном виде.

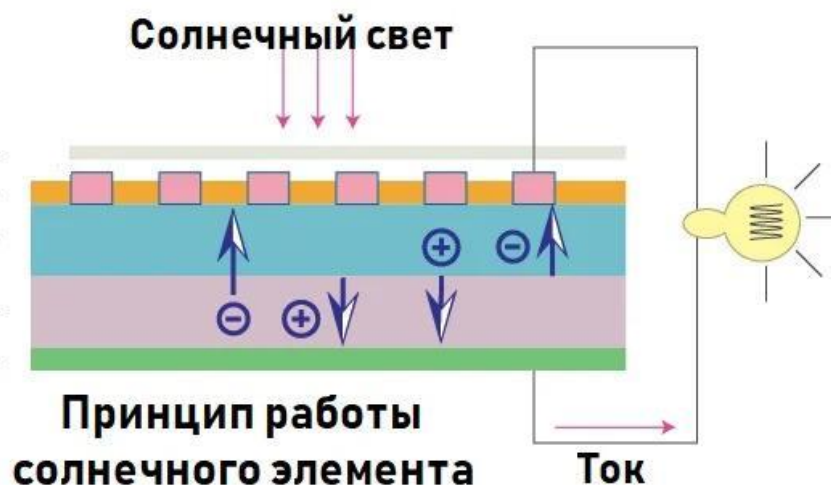


Рисунок 3 – Схема действия ФЭС в упрощенном виде

Солнечные генераторы, основанные на фотоэффекте, широко используются начиная от переносных заканчивая стационарными фотоэлектрическими системами. Например, солнечная электростанция «Солярис» ЭМС – 200 П при массе 70 кг имеет максимальную мощность 200 Вт, а максимальный ток 15 А.

1.3 Гидроэлектростанции

Самыми распространенными источниками энергии, среди возобновляемых являются ГЭС, которые по всей стране вырабатывают 18 % энергии от общей энергии по всем отраслям. Для эффективной работы и выработки энергии необходимы два основных фактора: обеспеченность достаточного уровня воды круглый год и большой уклон реки, который способствует скорости и напору течения. Поток воды попадая на лопасти гидротурбины заставляет вращаться ротор в электродвигателе. Таким образом, данная технология является аналогом ДЭС и относится к электромеханическим генераторам. Значимым преимуществом является двукратное снижение стоимости энергии относительно ТЭЦ, и возможность работать в большом диапазоне режимов. В то же время, ГЭС значительно удалены от потребителя в отличие от ТЭЦ, которые не привязаны к водоемам и могут строиться в самих населённых пунктах. Более дорогостоящее строительство и необходимость наличия значительной территории – так же относятся к минусам данных электростанций относительно тепловых электростанций.

1.4 Ветряные электростанции

Ветряные электростанции так же, как и ГЭС, и ДЭС относятся к электромеханическому типу генераторов. Принцип работы отличается лишь силой которая вращает ротор. В случае с ВЭС используется кинетическая сила потока частиц ветра. Скорость ветра прямо пропорционально расстоянию от земли, поэтому ветряные электростанции устанавливаются на больших высотах. К тому же, большое распространение относительно общего числа получили ветряные вышки, расположенные у побережья морей и океанов. Существуют единичные установки, установленные в море на расстоянии от 1 до 12 км от берега. Как не трудно догадаться, ветряные электростанции получили малое

распространение относительно других типов электростанций из-за отсутствия мест с постоянной среднегодовой скоростью ветров, достаточной для поддержания, конкурирующего значения КПД. Абсолютная зависимость от погодных условий делает ветряные установки недоступными для регионов с низкой среднегодовой скоростью ветра. На 2020 год доля ВЭС в России составляла подавляющее меньшинство – менее 1 %.

К дополнительным причинам столь малой распространённости относят так же не надёжность генерации энергии. К подобному сомнению привёл случай, произошедший в 2020 году в США, когда в период морозов многие ветряные электростанции вышли из строя и генерация энергии прекратилась на несколько месяцев.

1.5 Гибридные переносные установки

Существуют образцы гибридных переносных установок, содержащие в себе несколько энергетических элементов, объединённых вместе. Например, компания ООО «Президент-Нева» разработала гибридную контейнерную блочно - транспортабельную электростанцию мощностью 22 кВт, содержащую три значимых источника - дизель-генератор, фотоэлектрический модуль и ветряную станцию. Общий вид представлен на рисунке 4.



Рисунок 4 – Общий вид ГЭУ

Каждый генератор вносит свою мощность в общую, а именно:

- дизельный агрегат – 16 кВт, 230 В представлен на рисунке 5;
- фотоэлектрический модуль – 0,9 кВт, 220 В представлен на рисунке 6;
- ветрогенератор – 5 кВт, 48 В представлен на рисунке 7.



Рисунок 5 – Дизельный агрегат

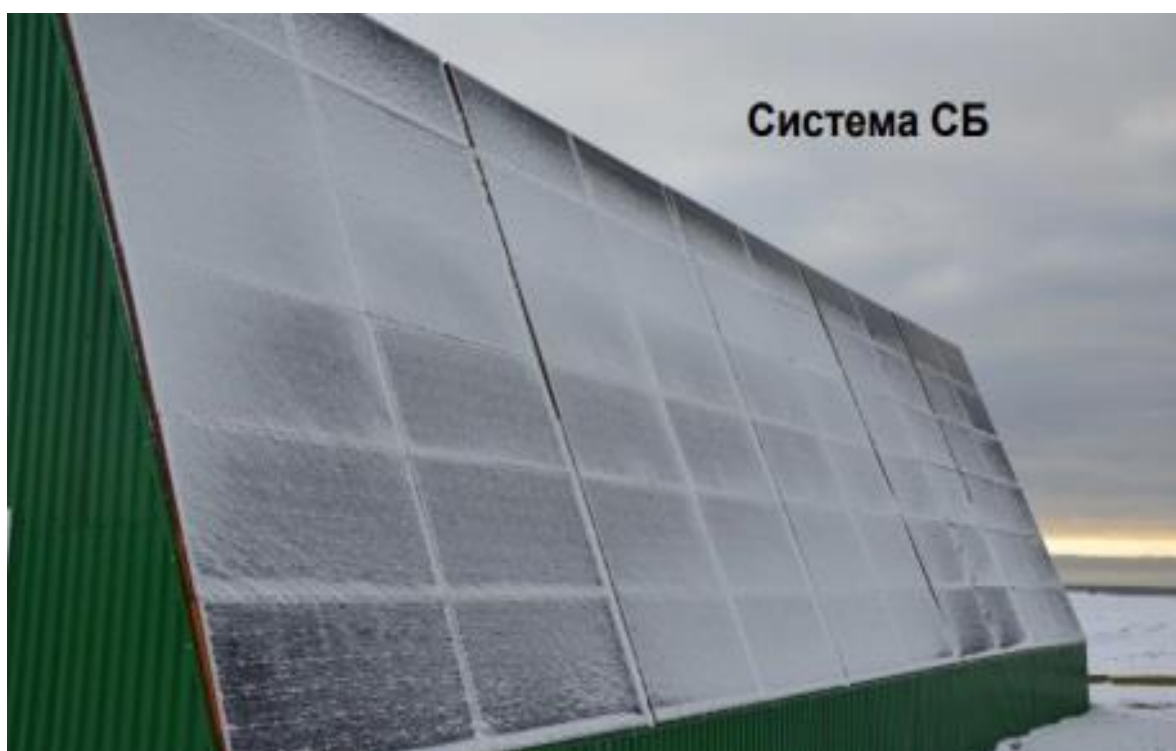


Рисунок 6 – Фотоэлектрический модуль



Рисунок 7 – Ветряной агрегат

Как видим, гибридные установки являются наиболее выгодными, с точки зрения бесперебойности, решением по тактико-техническим характеристикам среди всех вышеперечисленных установок. Общий вид гибридной установки в развернутом состоянии представлен на рисунке 8. Из минусов данных установок можно отметить их габаритные показатели, сложность в обслуживании, сложность маскировки данной установки, отсутствие серийного производства.



Рисунок 8 – Общий вид гибридной энергетической установки

В настоящее время в РФ достаточно качественных и надежных ветроэнергетических установок малой мощности (до 30 кВт). Их выпуск осуществляется от 20 до 25 российскими компаниями. Ветряные установки мощностью от 0,1 до 0,5 кВт выпускает московское предприятие «Молинос». ООО «Сапсан-энергия ветра» освоило выпуск электростанций мощностью 1 кВт. Двухлопастная ветроустановка ВЭУ-1500 реализуется компанией ООО СКБ «Спецремтекс». СКБ «Атик» продает на рынке ветряную установку мощностью 2 кВт. Трехлопастная ветряная установка – «Бриз 5000» мощностью 5 кВт производится ОАО «Электро-Сфера» (г. Санкт-Петербург). Предприятие ЗАО «Московские озонаторы» подготовили к серийному выпуску высококомбинированную ветродизельную станцию «Жаворонок», КПД таких станций составляет от 10 % до 15 %.

1.6 Водородно-кислородные топливные элементы

Основным путём развития энергетики в таких странах как Германия, США, Япония, Швеция считается альтернативная энергетика. Данный интерес обоснован двумя причинами: сокращение выбросов углекислого газа и других продуктов горения в атмосферу и исчерпавшая себя возможность увеличения КПД тепловых двигателей. В частности, технология топливно-водородных ячеек, основанная на обратном действии электролиза, где при соединении водорода и кислорода высвобождаются свободные электроны, благодаря чему создается разность потенциалов и происходит направленное движение электронов. В данной технологии напрямую преобразуется химическая энергия топлива в электрическую. Так, например, в США компания «EH-GROUP» занимается разработкой и выпуском таких элементов как для космических аппаратов, так и для военных целей. Мощность варьируется в зависимости от модели установки от 1 до 100 кВт. При дальнейшем сравнении убедимся, что данный способ получения энергии является отличной заменой существующих аккумуляторов и электростанций, работающих на сгораемом топливе. Несмотря на преимущества, данная технология опять же требует топлива в виде чистого водорода. В связи с несовершенством и недостаточной развитостью техноло-

гий получения водорода, в настоящее время не имеется возможность добычи чистого газа в полевых условиях. На рисунке 9 представлены водородные установки: ЕН-31 и ЕН-81.



Рисунок 9 – Водородные топливные элементы ЕН-31 и ЕН-81

В тоже время, стоимость водорода, полученного в лабораторных условиях, варьируется от 2,5 до 6,8 долларов за литр в США. В России на 2021 год цена составляет более 4 долларов за литр. Большинство стран отдают технологии топливных элементов. Связанно это с экологичностью и с тем что потенциал новой, относительно традиционных, технологии не раскрыт в полной мере. Топливные элементы преобразуют химическую энергию топлива в электрическую. Существуют различные виды установок (различающиеся по температуре и реагентам), но рассмотрим самую распространенную и высокоэффективную – щелочного топливного элемента, где в качестве топлива используется водород и кислород.

Принцип работы основан на окислительно - восстановительных реак-

циях между газами и этот процесс способен протекать до тех пор, пока не закончится поступление газов. При попадании водорода на анод, газ соединяется с гидроксид-ионами и окисляется с высвобождением электронов и образованием воды:



Образуется большой относительно катода, потенциал электронов на аноде. По этой причине образуется движение тока от анода к катоду, и в следствии происходит совершение работы на нагрузке. Далее, на катоде поступивший кислород, захватывает полученную воду и электроны:



Между анодом и катодом находится пористая матрица, наполненная специальным раствором щелочи (как правило - гидроксид калия).

Таким образом за один полный цикл элемент потребляет одну молекулу кислорода и две молекулы водорода. На выходе имеем две молекулы воды, и электрический ток и тепло (реакция происходит с выделением тепла), как побочные эффекты реакции. Принцип работы представлен на рисунке 10.

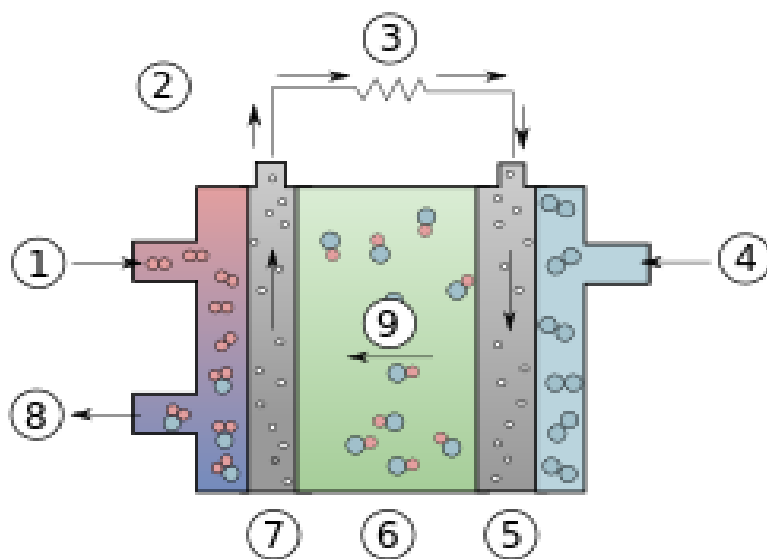


Рисунок 10 – Принцип работы водородного топливного элемента

Стоит учесть, что технология не создает шумового загрязнения, безвредна для окружающей среды, может использоваться практически при любых погодных условиях, не имеет подвижных частей, проста в использовании и обслуживании, обладает мобильностью.

К минусам можно отнести малую популярность данной технологии, и как следствие дорогое производство топливных ячеек. Малая развитость этой и других водородных технологии обусловлена высокой стоимостью добычи «зелёного» водорода, который добывается из воды и является более химически чистым и активным топливом по сравнению с «голубым» водородом, который добывается из природного газа и имеет примеси других газов. Очистка «голубого» водорода до практически простого вещества является нецелесообразной в экономическом плане, и стоимость газа на выходе будет значительно выше, чем газ, полученный из воды. При использовании плохо отчищенных газов в элемент станут попадать другие вещества, вступая в реакцию и осаждаясь в порах электродов (в частности при реакции с CO_2) и блокируя его, что сильно скажется на выдаваемой мощности тока.

Целесообразнее для долговечной работы элементов использовать очищенный газ, либо модернизировать установки внедрением дополнительных фильтров.

2 РАСЧЁТ ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА ГИБРИДНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

На практике наиболее эффективным и оптимальным решением проблемы полевого обеспечения энергии по сравнению с водородными ячейками являются гибридные источники энергии.

Объясняется данный факт двумя причинами. Первая причина заключается в отсутствии водородного топлива в списке возможных энергоносителей, из чего следует что нет необходимых средств и служб для хранения и обслуживания данного топлива. Попытка внести водород в реестр возможных видов топлива повлечет за собой реструктуризацию ВС РФ, что потребует значительное количество времени, а также ресурсов. Вторая причина – несовершенство технологии добычи водорода в полевых условиях. Существующей полевой технологии не хватает качества добываемого топлива для использования его в водородных ячейках, поэтому газ получается с нежелательными примесями. Данные примеси могут вступать в реакцию на катоде и аноде, осажаясь и ухудшая контакт электродов, что понизит скорость вырабатываемой энергии. В полевых условиях это может оказаться критически важным фактором. Для получения газа в удовлетворяющем виде необходимо транспортировать и развернуть комплекс оборудования, что приводит к экономически не целесообразному получению водорода непосредственно в месте использования.

По данным соображениям, практический интерес на данный момент предоставляет ГИЭ, который в отличие от ДЭС имеет и другие агрегаты получения возобновляемой энергии, благодаря чему время работы дизельного агрегата сокращается, что приводит к меньшему износу и экономии топлива.

Несмотря на это, гибридные установки имеют ряд не решенных проблем. Одной из таких проблем является компоновка энергетической установки, а именно какой агрегат и в какой соотношении устанавливать для полного удовлетворения энергетических затрат военных объектов и при этом свести затраты на полное производство и обслуживание к минимуму.

Одним из факторов влияющем на суммарные затраты является время работы дизельного агрегата, и как следствие количество используемого топлива. Решением может показаться полностью исключить дизельный агрегат и пользоваться лишь возобновляемыми источниками энергии, однако на практике установка и обслуживание агрегатов для ВИЭ является более выгодным вариантом, чем эксплуатация ДЭС, только при долгосрочном использовании.

К тому же, мощность, вырабатываемая ВИЭ, является скачкообразной и очень сильно зависит от погодных условий. Погодные условия являются детерминированной системой, поэтому мы можем предсказать их только с определенной долей вероятности. Учитывая данный факт, энергию от ВИЭ нельзя назвать надежной, что является решающим фактором при обеспечении гарантированной энергией полевых объектов. Для выполнения условий гарантированного энергообеспечения нельзя рассчитывать на ненадежные источники энергии, поэтому в ГИЭ всегда должен присутствовать дизельный агрегат, причем такой мощности, что бы в любые часы он мог покрыть все необходимые нужды военного объекта без вклада ВИЭ. В таком случае дополнительная установка агрегатов ВИЭ рассматривается как способ сократить время работы дизельного агрегата.

Учитывая выше сказанное, есть 2 схемы дальнейшей работы:

1) Использовать ДЭУ мощнее чем необходимо, для того чтобы в пики минимума производительности агрегатов ВИЭ, дизельный агрегат мог полностью покрывать необходимую мощность для потребителя. Это решение приведет к дополнительным затратам на установку и обслуживания ДЭС большей мощности.

2) Использовать аккумуляторные батареи, для накопления энергии в пики максимума выработки ВИЭ и ее отдачи во время малой активности ВИЭ и большой нагрузки потребителей. При этом потребуются затраты на установку дополнительных батарей, но сократятся ежедневные расходы на топливо [3].

В дальнейших рассуждениях будем придерживаться использования дополнительных аккумуляторных батарей. Что бы использование агрегатов ВИЭ

было целесообразно необходимо что бы экономия от меньшего времени работы дизельного агрегата перекрывала затраты на приобретение и обслуживание ВИЭ.

Таким образом необходимо найти комплектацию, максимально удовлетворяющую условию целесообразности. Учитывая данный факт для вычисления искомой комплектации, необходимо устремить затраты к минимуму:

$$Z_{\Sigma}^{\text{пр}}(T) = Z_{\text{ВЭУ}}^{\text{пр}} + Z_{\text{ФЭУ}}^{\text{пр}} + Z_{\text{ГЭУ}}^{\text{пр}} + Z_{\text{АКБ}}^{\text{пр}} + Z_{\text{ДЭУ}}^{\text{пр}} + Z_{\text{ПР}}^{\text{пр}} \rightarrow \min, \quad (3)$$

где $Z_{\text{ВЭУ}}^{\text{пр}}$ – стоимость затрат на ВЭУ;

$Z_{\text{ФЭУ}}^{\text{пр}}$ – стоимость затрат на ФЭУ;

$Z_{\text{ГЭУ}}^{\text{пр}}$ – стоимость затрат на ГЭУ;

$Z_{\text{АКБ}}^{\text{пр}}$ – стоимость затрат на АКБ;

$Z_{\text{ДЭУ}}^{\text{пр}}$ – стоимость затрат на ДЭУ;

$Z_{\text{ПР}}^{\text{пр}}$ – стоимость затрат на прочие расходы.

Однако, при устремлении затрат к минимуму, необходимо чтобы конфигурация удовлетворяла условию равновесия энергии, тогда вырабатываемая энергия будет больше, чем необходимая для потребителя. Подобная точка баланса напрямую зависит от погодных условий в данном регионе, соответственно для каждого региона необходимо отдельно рассчитать комплектацию агрегатов. Уравнение необходимой энергией имеет вид:

$$P_{\text{потр}}(t) \leq N_{\text{ВИЭ}}(t) - \Delta N_{\text{ВИЭ}}^{\text{пот}}(t) + N_{\text{ДЭУ}}(t) - \Delta N_{\text{ДЭУ}}^{\text{пот}}(t) + N_{\text{АКБ}}(t), \quad (4)$$

где $P_{\text{потр}}(t)$ – среднее потребление электроэнергии за час;

$N_{\text{ВИЭ}}(t)$ – средняя мощность выработки ВИЭ за час;

$\Delta N_{\text{ВИЭ}}^{\text{пот}}(t)$ – значение потери энергии для ВИЭ, уходящие на собственные нужды установок;

$N_{\text{ДЭУ}}(t)$ – средняя мощность выработки ДЭУ за час;

$\Delta N_{\text{ДЭУ}}^{\text{пот}}(t)$ – значение потери энергии для ДЭУ, уходящие на собственные нужды установок;

$N_{\text{АКБ}}(t)$ – средняя мощность, полученная от накопленного заряда АКБ.

Существует множество возможных вариантов составления номенклатуры. Заранее предсказать какой из вариантов окажется оптимальный невозможно. Для подобных расчетов и нахождения оптимального решения необходимо составить список всех возможных комплектации и просчитать для каждого варианта суммарные затраты и общую выработку электроэнергии от ВИЭ. Тогда можно провести анализ всех вариантов по двум параметрам и найти оптимальную номенклатуру.

На данный момент существует методика вычисления всех вариантов и подсчета их параметров, в том числе и суммарные затраты, и общую выработку электроэнергии. Результатом работы данной методики является список возможных вариантов номенклатур, где целесообразно использование элементов выработки энергии от возобновляемых источников энергии.

Стоит отметить, что среди множества вариантов, методика не определяет какой из вариантов является самым оптимальным, что является важной и наукоемкой задачей. Используя и преобразуя математические модели энергетического потенциала, необходимо определить возможность автоматизации работы данной методики, путем разработки программного обеспечения.

2.1 Обзор математических моделей для выработки энергии у возобновляемых источников энергии

Для определения энергетического потенциала возобновляемых источников энергии необходимо иметь базу данных по климатическим условиям в определенных точках РФ. Данным информационным обеспечением являются базы данных NASA, где вводится широта и долгота вычисляемой точки и по запросу предоставляется список климатических параметров [4]. В том числе и параметры необходимые для составления математической модели, такие как:

- 1) среднемесячные дневные показатели прямой, рассеянной и солнечной

радиации;

2) среднемесячное число ясных дней;

3) среднемесячное количество облаков в течении светового дня;

4) среднемесячная температура воздуха на уровне 10 м;

5) среднемесячные значения скорости ветра на высоте 50 м от поверхности земли;

б) альbedo земной поверхности.

Как известно, количество солнечной радиации, которое можно использовать, зависит от долготы и широты в исследуемой точке, а также от угла наклона солнечной панели по отношению к солнечным лучам, и максимум приходится на перпендикулярную поверхность относительно солнечных лучей. Увеличить количество получаемой энергии позволяет автоматическая дневная корректировка угла наклона солнечных элементов, которые следуют за положением солнца. Таким образом, данная система позволяет увеличить количество вырабатываемой энергии летом от 25 % до 40 %, зимой от 10 % до 15 %. Солнечное излучение, дошедшее до земной поверхности, делится на 2 вида: прямое излучение – излучение, поступающее от Солнца, и диффузионное излучение – излучение в следствие отражения или преломления солнечных лучей от различных поверхностей.

Для формирования математической модели генерации энергии за счёт агрегатов ФЭС используют данную формулу:

$$\mathcal{E}_{\text{ФЭУ}}^{\text{пол}}(i) = \sum E_{\text{н}}^{\beta}(i) \cdot S_{\text{сп}} \cdot n_{\text{сп}} \cdot \tau_{\text{зап.сл}} \cdot \eta_{\text{СП}}^{\text{НОМ}} \cdot K_{\text{зап}} \cdot K_{\text{град}} \cdot \eta_{\Delta N}, \quad (5)$$

где $\mathcal{E}_{\text{ФЭУ}}^{\text{пол}}(i)$ – полная энергия полученная от ФЭС за i час;

i – час года;-

$E_{\text{н}}^{\beta}(i)$ – суммарный приход за один час года солнечного излучения на приемную площадку, расположенную под оптимальным углом наклона к горизонту β ;

$S_{\text{сп}}$ – площадь солнечной панели;

$n_{\text{СП}}$ – количество солнечных панелей;

$\tau_{\text{зап.сл}}$ – коэффициент светопропускания защитного покрытия солнечного модуля;

$\eta_{\text{СП}}^{\text{НОМ}}$ – номинальный КПД солнечного модуля;

$K_{\text{зап}}$ – коэффициент заполнения солнечными элементами всей площади солнечного модуля;

$K_{\text{град}}$ – коэффициент, учитывающий влияние температуры солнечного модуля на его КПД;

$\eta_{\Delta\text{N}}$ – коэффициент, определяющий собой потери мощности при последовательном соединении солнечных модулей. В модели принят равным 0,97.

Как не трудно заметить, в формуле происходит расчёт выработанной энергии за час, и дальнейшее суммирование по каждому часу в году. Суммарный приход за каждый час в году берется из базы данных, упомянутых выше [4].

Для прогнозирования работы ветрового агрегата и подсчета его потенциала необходимо иметь данные о среднечасовых скоростях ветра в данной географической точке.

В данной методике предлагается рассчитать энергетический потенциал по описанному ниже алгоритму. В ходе расчета предполагается, что известны исходные данные:

- 1) многолетние наблюдаемые среднемесячные скорости ветра - $u_j^{\text{ср.сут}}$;
- 2) высота флюгера - $h_{\text{ф}}$;
- 3) параметры функции распределения Вейбулла – β ;
- 4) коэффициент вариации – C_v ;
- 5) класс открытости станции – K_o .

Шаг 1. Уточнение значений $u_j^{\text{ср.сут}}$ с учетом высоты флюгера и класса открытости местности, с целью получение более приближенных значений для данной точки:

$$u_{\text{нор}j}^{\text{ср.сут}} = u_j^{\text{ср.сут}} \cdot K_o \cdot K_h, \quad (6)$$

где K_0 – коэффициент открытости станции;

$$K_h = \left(\frac{H}{h_\phi}\right)^m \text{ – поправочный коэффициент высоты;}$$

m – показатель степени, в общем случае зависит от скорости ветра, рельефа местности и шероховатости поверхности;

H – высота с максимальным средним энергетическим потенциалом ветрового потока в данной точке.

Шаг 2. Определение повторяемости ветра в диапазоне от 0 до максимально возможного в данной точке, используя функцию распределения Вейбулла:

$$f(u) = \frac{\gamma}{\beta} \left(\frac{u}{\beta}\right)^{\gamma-1} \cdot \exp\left(-\frac{u}{\beta}\right)^\gamma, \quad (7)$$

где u – градация скорости ветра;

β – параметр масштаба, численно близкий к величине среднего значения скорости ветра;

γ – параметр формы кривой распределения.

Шаг 3. Определение верхней и нижней возможной границы суточной скорости ветра:

$$u_{\text{нор}j}^{\text{ср.сут}_{\text{гран}}} = u_{\text{нор}j}^{\text{ср.сут}} \pm u_{\text{нор}j}^{\text{ср.сут}} \cdot C_v, \quad (8)$$

где C_v - коэффициент вариации средних скоростей.

Шаг 4. Построение типичного суточного изменения скорости ветра для каждого граничного значения по формуле:

$$u_j = u_{\text{нор}j}^{\text{ср.сут}_{\text{гран}}} \cdot \left\{ 1 + \delta \cdot \cos\left[\left(\frac{2\pi}{24}\right)(1 - \varphi)\right] \right\}, \quad (9)$$

где δ – коэффициент, показывающий связь скорости ветра и времени суток, колеблется в пределах от 0 до 0,4;

i – расчетный час суток;

φ – час, в который обычно наблюдается максимальная суточная скорость ветра.

Шаг 5. Расчет данных по часовым значениям скорости ветра в течение расчетных месяцев на основе повторяемости и суточного хода скорости ветра.

Шаг 6. Смоделированная почасовая последовательности значений энергетического потенциала ветреного потока в течении года записывается и используется методикой для дальнейших расчётов и вычисления выработанной электроэнергии.

Далее, подставляя значения потенциала ветра из часовой последовательности в формулу, полученную с помощью математических преобразований, рассчитывается генерация электроэнергии на каждом часу:

$$N_{ВЭУ}^{пол} = N_{ВЭУ}^{ном} \cdot (-4,9909 + 68,5187 \cdot V(i) - 384,8555 \cdot V^2(i) + 1156,9547 \cdot V^3(i) - 2002,3719 \cdot V^4(i) + 2010,8539 \cdot V^5(i) - 1088,8419 \cdot V^6(i) + 245,7366 \cdot V^7(i)), \quad (10)$$

где V – скорость ветра на i часу.

Полезная мощность ВЭУ, идущая на питание нагрузки, определяется как разность между полной полученной мощностью ВЭУ и мощностью, уходящей на собственные нужды ветрового агрегата [4]. Как можно отметить, на собственные нужды принято около 1 % от общей мощности выработки.

Тогда суммируя полезную мощность каждого часа, получим мощность генерации ВЭС за год.

В некоторых районах имеются водоемы с достаточной мощностью и скоростью течения потока воды, для того чтобы использовать агрегаты ГИЭ для дополнительной выработки электроэнергии. Стоит отметить, что географических точек с удовлетворяющими условиями – подавляющее меньшинство.

Мощность, развиваемая турбиной:

$$N_{турб.} = 9.81 \cdot Q \cdot H \cdot \eta_{тур}, \quad (11)$$

где Q – расход воды;

H – напор водотока;

$\eta_{\text{тур}}$ – КПД турбины.

Электрическая мощность генератора определяется по формуле [7]:

$$P_{\text{ген}} = \eta_{\text{ген}} \cdot N_{\text{турб.}}, \quad (12)$$

где $\eta_{\text{ген}}$ – КПД генератора.

Электрическая мощность, развиваемая микро-ГЭС:

$$N_{\text{ГЭС}} = 9,81 \cdot Q \cdot H \cdot \eta_{\text{ГЭС}}, \quad (13)$$

где $\eta_{\text{ГЭС}}$ – КПД микро-ГЭУ.

Как упоминалось выше, в наших рассуждениях мы придерживаемся модели работы ГЭУ с использованием дополнительных элементов питания. Обоснован данный факт возможностью сократить работу ДЭС за счет накопления электроэнергии в моменты максимума работы ВИЭ, когда вырабатываемая энергия превышает потребляемую. Вторым фактором, обуславливающим данное решение, основан на возможности за счет накопленной энергии сглаживать скачки энергии, вырабатываемой ВИЭ [4].

Таким образом, использование АКБ в нашей установки приводит к появлению дополнительных ограничений:

- 1) максимально возможная глубина разряда аккумуляторных батарей не должна превышать 70 % от их номинальной емкости;
- 2) зарядный ток АКБ не должен превышать 10 % от их номинальной емкости;
- 3) разрядный ток АКБ не должен превышать 15 % от их номинальной емкости.

Наличие дополнительных элементов накопления энергии в виде АКБ значительно усложняет построение модели работы ГИЭ, так как необходимо

учитывать перечисленные выше условия.

2.2 Архитектура приложения

Перед началом разработки необходимо составить и продумать входные и выходные данные, а также алгоритм работы программы.

Так как расчёт необходимо будет вести для разных географических точек, то первыми входными данными будут являться географические координаты предположительной точки размещения ГЭУ. После координат необходимо подать на вход минимальную необходимую мощность ГЭУ для конкретного полевого объекта. Верхняя граница мощности ограничена только экономическим фактором.

В конце работы программа должна определять среди всех рациональных вариантов самый оптимальный, где затраты стремятся к минимуму, а выработанная энергия стремится к максимуму. Рациональной в данном случае называется конфигурация, где экономически целесообразно использовать агрегаты ВИЭ.

Программное обеспечение будет реализовано на языке Python с помощью графической библиотеки tkinter. Использование дополнительной библиотеки обосновано необходимостью наличия графического интерфейса с целью облегчения взаимодействия пользователя с программой. Выбор языка программирования обоснован следующими причинами:

- 1) мультипарадигменный язык программирования;
- 2) отсутствие требований к высокой производительности;
- 3) масштабируемость;
- 4) независимость от платформы использования.

Исходя из вышесказанного, программу целесообразно разбить на 3 модуля:

- 1) `Static_data.py`.
- 2) `Main.py`.
- 3) `GUI.py`.

В первом модуле `static_data.py` содержатся климатические данные по-

лучаемые из запроса к базам данных. Набор статических переменных, используемых для расчётов в данной методике также были размещены в данном модуле. На рисунке 11 представлен листинг модуля.

```
static_data.py x
PythonProject > Program for MixedElectricEquipment > script > static_data.py > Configuration > __init__ > akb
1 #Статические переменные и энергетические потенциалы для данной территории
2 > LIST_POWER_WIND = [0.8511537248131329, ...
8763 > LIST_POWER_SUN = [0, ...
17524 LIST_MONTH_TEMP = [-15, -17, -5, 3, 15, 22, 28, 27, 16, 7.5, -5, -20]
17525 KPD_SUN_ENERGY_SETTING = 0.5
17526 KPD_SUN_PANEL = 0.3
17527 SPECIFIC_COST_WIND_UNIT = 200
17528 SPECIFIC_COST_SUN_UNIT = 120
17529 SPECIFIC_COST_WATER_UNIT = 75
17530 SPECIFIC_COST_DIZEL_UNIT = 90
17531 SPECIFIC_COST_AKB1 = 100
17532 SQUADE_SUN_PANEL = 3.3
17533 CAPACITY_BATTERY = 100
17534 MARK_ADD_COST = 10
17535 MARK_ADD_SETUP_COST = 25
17536 KEF_SUN_GUARD = 0.97
17537 KEF_FULL_SUN = 0.95
17538 KEF_LOST_POWER = 0.97
17539 PRICE_DIZEL = 100
17540 COUNT_YEARS = 20
17541
17542
17543
17544 #Создаем класс для хранения конфигураций и их значений
17545 class Configuration:
17546     #функция создания объекта
17547     def __init__(self, *dizel=0, wind=0, sun=0, water=0, akb=0):
17548         self.sun_energy = sun
17549         self.wind_energy = wind
17550         self.water_energy = water
17551         self.dizel_energy = dizel
17552         self.akb_energy = akb
```

Рисунок 11 – Листинг модуля static_data.py

После объявления переменных идет описания собственного класса Configuration, служащего для хранения информации о составе каждой номенклатуры, а именно:

- 1) значение мощности СЭС;
- 2) значение мощности ВЭС;
- 3) значение мощности мини-ГЭС;
- 4) значение мощности ДЭС;
- 5) значение емкости АКБ;
- 6) суммарная выработанная альтернативная энергия за 20 лет;
- 7) экономия от сокращения использования топлива для ДЭС за 20 лет.

На рисунке 12 можно увидеть реализацию функции для подсчёта суммарной выработанной энергии ВИЭ (count_energy) и функции для подсчёта экономии (count_cost). Также в данном модуле помещена функция для составления списка всех возможных вариаций номенклатур в определенной географической точке, для дальнейшей фильтрации по этому списку.

```
static_data.py
PythonProject > Programm for MixedElectricEquipment > script > static_data.py > Configuration > count_cost
17587 def count_cost(self):
17588     result_cost = 0
17589
17590     #Подсчёт ВЭУ
17591     result_cost += SPECIFIC_COST_WIND_UNIT * self.wind_energy
17592
17593     #Подсчёт СЭУ
17594     result_cost += SPECIFIC_COST_SUN_UNIT * (KPD_SUN_ENERGY_SETTING * SQUADE_SUN_PANEL * self.sun_energy*5)
17595
17596     #Подсчёт ГЭУ
17597     result_cost += SPECIFIC_COST_WATER_UNIT * self.water_energy
17598
17599     #Подсчёт ДЭУ
17600     result_cost += self.dizel_energy * SPECIFIC_COST_DIZEL_UNIT
17601
17602     #Подсчёт АКБ
17603     result_cost += (CAPACITY_BATTERY * (self.akb_energy/1.2) * SPECIFIC_COST_AKB1)/1000
17604
17605     #Дополнительные затраты
17606     result_cost *= 100 / (100 - MARK_ADD_COST)
17607
17608     #Установка и монтаж
17609     setup_cost = result_cost * MARK_ADD_SETUP_COST/100
17610     result_cost += setup_cost
17611
17612     #Подсчёт экономии средств на топливо от работы ВИЭ
17613     work_power = self.dizel_energy * 0.35
17614     if work_power:
17615         num_hour = self.sum_energy / work_power
17616         result_cost = (num_hour*work_power* PRICE_DIZEL)/1000 - result_cost
17617
17618     return result_cost
```

Рисунок 12 – Листинг функции count_cost

Модуль GUI.py представлен на рисунке 13.

```
GUI.py
PythonProject > Programm for MixedElectricEquipment > script > GUI.py > ...
1 import tkinter as tk
2 from main import Result_Dict_Object
3
4 WIDTH_WINDOW = 1200
5 HEIGHT_WINDOW = 600
6
7
8 class Program(tk.Tk):
9     def __init__(self):
10         super().__init__()
11         self.resizable(False, False)
12         self.title("DEFINITION OPTIMAL CONFIGURATION")
13         self.geometry(f'{WIDTH_WINDOW}x{HEIGHT_WINDOW}+{self.get_width()}+{self.get_height()}')
14
15
16     #Поля для ввода координат
17     self.label_long = tk.Label(text='Введите долготу : '\
18         .grid(row=0, column=0, sticky='e', ipady=5, pady=5)
19     self.entry_long = tk.Entry(self)\
20         .grid(row=0, column=1, sticky='w')
21
22     self.label_width = tk.Label(text='Введите широту : '\
23         .grid(row=1, column=0, sticky='e')
24     self.entry_width = tk.Entry(self)\
25         .grid(row=1, column=1, sticky='w')
26
27     #Поле вывода информации
28     self.text_result = tk.Text(
29         self, height=23, wrap='word',
30         font=('Comic Sans MS', 11, 'bold'),
31         bd=7, width=125)
32     self.text_result.grid(row=2, rowspan=5, column=0,
```

Рисунок 13 – Листинг модуля GUI.py

В модуле GUI.py содержится описание расположения полей для считывания координат и полей для вывода информации. В практической реализации данный модуль отвечает за графическое представление и вывод информации. Графическая библиотека используется с целью упрощения работы с программным обеспечением для пользователей.

Модуль main.py является связующим звеном для модулей static_data.py и GUI.py. Именно здесь находится точка входа в программу, которая при ини-

циализации вызывает функции и переменные из других модулей.

На рисунке 14 представлено описание класса Result_Dict_Object.

```
main.py
PythonProject > Programm for MixedElectricEquipment > script > main.py > ...
1 from static_data import calculate_list_object, Configuration
2
3 STEP_COST = 20000
4
5 class Result_Dict_Object(dict):
6     def __init__(self):
7         self.step = STEP_COST
8         self.list_object = calculate_list_object()
9         self.max_value_cost = max(self.list_object, key=lambda x: x.cost).cost
10        self.result_list_dict = self.calculate_result_list_dict()
11
12
13        #Функция отсеивания объектов по цене.
14        def cost_filter(self, value_price, dizel_value):
15            return list(filter(lambda x: x.dizel_energy == dizel_value and
16                               x.cost <= value_price and
17                               x.cost > 0,
18                               self.list_object))
19
20
21        #Функция выбора оптимального объекта по значения выработки энергии для ограниченной стоимости
22        def max_energy_object(self, edge_price, dizel_value):
23            cost_list = self.cost_filter(edge_price, dizel_value)
24
25            if cost_list:
26                return max(cost_list, key = lambda x: x.sum_energy)
27            return Configuration()
28
29
30        #Функция подсчёта результирующего списка
31        def calculate_result_list_dict(self): ...
49
```

Рисунок 14 – Листинг модуля main.py

Данный класс является модификацией, встроенного в стандартную библиотеку языка Python, класса dict. Модифицированный класс представляет из себя ассоциативный массив данных, где ключом для хранения информации является значение выгоды полученной от сокращения времени работы ДЭС. Как можно увидеть на рисунке 4, функция cost_filter отвечает за фильтрацию объектов, где экономически не выгодно использовать ВИЭ.

На выходе модуль main.py выводит список комплектации ГИЭ, который является самым оптимальным для конкретного географического положения. Сортировка списка осуществляется от наибольшей экономии к наименьшей с шагом 20000 условных единиц.

2.3 Описание работы алгоритма отбора оптимальной комплектации

Принцип выбора наиболее рационального варианта номенклатуры основан на методе решения задач по принципу динамического программирования. Данный метод используется при решении задач по типу о рюкзаке и его вариаций. Главный принцип решения задач подобного вида основан на разбие-

ние задач на подзадачи до тех пор, пока не сведется к минимуму, где ответ будет известен. Разбиение задачи на подзадачи осуществляется путем ограничения некоторых параметров до минимума, с последующем расширением задачи. Далее с помощью рекурсивной зависимости и формулу описывающей данную зависимость мы находим ответ для остальных более сложных случаев.

В стандартном виде решение задачи представляет таблицу, где по вертикали j находится определенная возможная комплектующая, а по горизонтали i – максимальный возможный вес в данном варианте W . Так же отметим, что при сборке рюкзака мы можем использовать комплектующие только те, что находятся выше или в той же горизонтальной линии, что и мы в данный момент. Таким образом, мы упрощаем задачу, ограничивая наш выбор комплектующих, которые мы можем использовать [5].

В классической задаче необходимо найти самый дорогой вариант комплектации предметов в рюкзак, учитывая ограниченную вместимость, разные стоимости и веса у предметов. Постепенно заполняя таблицу в каждой строке, мы добавляем предмет в список возможно используемых комплектующих, тем самым сводя задачу к реальной. В саму таблицу записывается максимально возможное значение общей стоимости для данных условий P . Условиями являются: ограничение по весу W и ограничения возможности использования в наборе комплектующих находящихся не ниже горизонтальной линии, которую мы заполняем в данный момент. Для вычисления самого выгодного варианта при данных условиях используется рекурсивная зависимость, учитывающая максимальное значение стоимости для предыдущего варианта:

$$P_{i,j} = \max[P_{maxi} + (P_j - P_{maxi}) \quad \& \quad P_{i-1,j}], \quad (14)$$

где $P_{i,j}$ – максимальная стоимость в i -строке, j -столбце;

P_{maxi} – стоимость текущей комплектующей;

$(P_j - P_{maxi})$ – стоимость оставшегося пространства;

$P_{i-1,j}$ – предыдущее максимальное значение в $i-1$ строке и j -столбце.

Далее происходит заполнение таблицы в соответствии с формулой, описывающей зависимость. Ответ на требуемый вопрос будет лежать в самой последней ячейке.

Алгоритм имеет множество вариации с различными переменными, но нам в нашем случае больше всего подходит именно классический алгоритм. Для его использования в нашей задаче необходимо произвести замену переменных и провести модернизацию алгоритма.

В нашей задаче нам необходимо провести анализ вариантов комплектаций ГИЭ и среди всех вариантов выбрать наиболее оптимальный по 2 параметрам:

- 1) суммарная стоимость и затраты на установку *Price*;
- 2) выработанная электроэнергия *Energy*.

Как не трудно догадаться, первый параметр необходимо минимизировать, при этом выбрав вариант с максимальной выработанной электроэнергией. Проведя аналогию для решения нашей задачи, логически верно будет заменить вес рюкзака W из оригинальной задачи на суммарную стоимость и затраты на установку электроустановки *Price*, так как оба эти параметра минимизируются.

Таким образом, каждый столбец будет представлять верхний предел значения суммарных затрат, который возможен на данном этапе вычислений. Выработанная электроэнергия *Energy* будет являться нашим аналогом на стоимость рюкзака P при данном варианте. Вместо конкретных предметов, как в классической задаче, каждая строчка будет привязана к каждому типу источников электроэнергии, а значение во всей строчке будет обозначать будем ли мы использовать данный тип электроустановок в данном варианте или нет. Исключение составляет дизельная электроустановка, так как значение мощности данной установки не бывает равной нулю.

Таким образом, например, в первой строчке мы будем выбирать вариант комплектаций только среди номенклатур, где используется только ДЭУ и СЭУ. Во второй строке мы уже можем выбирать среди вариантов с использо-

ванием ДЭУ, СЭУ и ВЭУ, так продолжая до последней строки, где разрешено будет выбирать среди всех вариантов [6].

Такая таблица будет составлена для каждой мощности объекта из возможных мощностей из списка: $power = [8, 16, 30, 50, 80, 100, 500, 1000]$.

По причине того, что дизельные установки разной мощности присутствуют в каждом варианте, мы зафиксируем значение ДЭС в $k = 0$ позиции списка $power$, далее увеличивая k на единицу, перемещаясь по списку и фиксируя значения ДЭС в каждой позиции списка мы будем составлять динамическую таблицу для каждого значения ДЭС. В итоге получим список самых оптимальных вариантов комплектаций ГЭУ для объектов каждой мощности.

В сами ячейки будут записываться не стоимость набора предметов P как в классической задаче, а значения выработанной электроэнергии $Energy$. Тогда формула, описывающая рекурсивную зависимость, будет выглядеть следующий образом:

$$Energy_{i,j} = \max[Energy_{i-1,j} \& \max(Energy_i) + Energy(d)], \quad (15)$$

где $Energy_{i,j}$ – значение энергии при ограниченных затратах j и возможность использовать только те виды источников энергии, которые лежат не ниже i строки;

$Energy_{i-1,j}$ – значение предыдущего максимума выработанной энергии;

$\max(Energy_i)$ – значение максимума энергии для целой строчки;

$Energy(d)$ – значение энергии при ограничении затрат j минус $Price(\max[Energy_i])$ и возможность использовать только те виды источников энергии, которые лежат не ниже i строки.

Таким образом, получается таблица с энергиями самыми оптимальными вариантами в определенном ценовом сегменте. Значения суммарных затрат j следует выбирать, учитывая максимальный и минимальный порог, всех вариантов так, чтобы шаг между значениями был равномерно распределен и конечное значение охватывало все варианты. Тогда в последней ячейке будет

находиться самый оптимальный вариант при неограниченной стоимости и суммарных затрат. В случае отсутствия хотя бы одного варианта, удовлетворяющего ограничивающим условиям, в ячейку таблицы записывается число, которое заведомо известно будет меньше любого из возможных значений суммарной выработанной электроэнергии. В нашем случае, по причине отсутствия отрицательных значений энергии у каждого из вариантов, допустимо использовать нуль для обозначения отсутствия хотя бы одного из вариантов. Таким образом, не нарушается логика работы алгоритма и уравнение рекурсивной зависимости работает и в данном случае [7].

Блок-схема представлена на рисунке 15. Пошагово, согласно данной блок-схеме, можно описать весь процесс следующим образом.

Шаг 1. Как можно заметить, на первом шаге происходит считывание всех вариантов возможных комплектаций ГИЭ, посчитанных заранее в модуле `static_data.py` по которым мы и будем итерироваться, выбирая вариант с самой большой суммарной общей выработкой электроэнергии, но при этом подходящий под разные условия в каждой ячейке. Данные варианты и будут попадать в ячейки. На следующем этапе в первом шаге происходит инициализация переменной k и присваивание ей значения нуля. Данная переменная имеет смысл позиции в списке возможных мощностей ДЭС: $power = [8, 16, 30, 50, 80, 100, 500, 1000]$.

Напомним, что отсчет позиции в списках начинается с нуля. Таким образом, на выходе у программы будет 8 заполненных таблиц (по одной для каждой мощности ДЭС), в каждой из которых мы сможем найти оптимальный вариант по ценовому диапазону или без него, в зависимости от условий задачи. В каждой из 8 таблиц будет одно и тоже значение мощности ДЭС, в зависимости от значения k , которое увеличивается на единицу всякий раз, когда заполняется одна из таблиц.

Шаг 2. На втором шаге мы убеждаемся, что $k < 7$, что говорит о том, что алгоритм не дошел до конца и продолжаем выполнение. Если же $k > 7$, значит все 8 таблиц заполнены и алгоритм закончил выполнение – выход из

алгоритма.

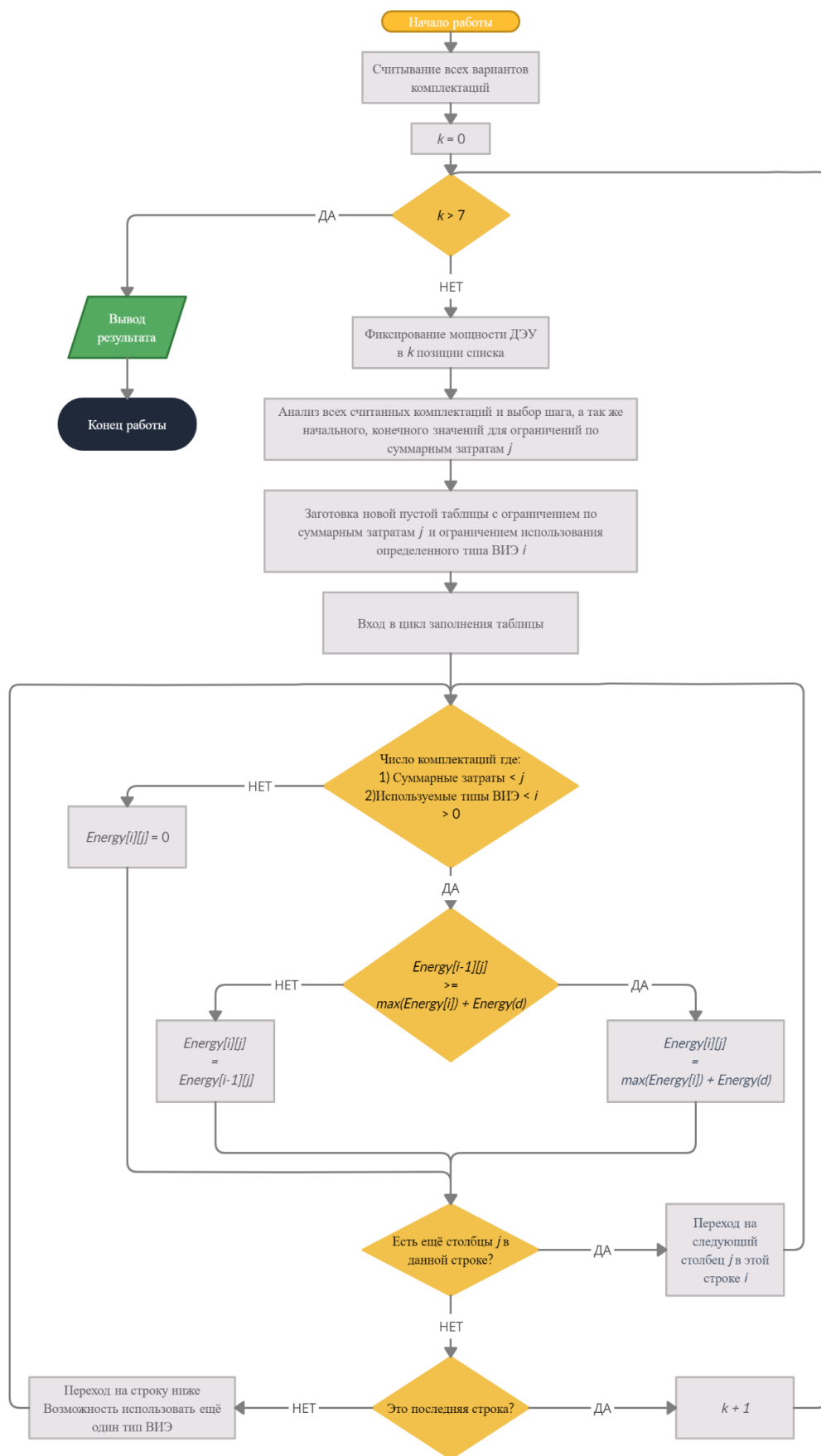


Рисунок 15 – Блок-схема алгоритма программного обеспечения

Шаг 3. Фиксируем мощность ДЭУ в зависимости от значения k . Теперь до конца заполнения таблицы мы будем выбирать только из вариантов комплекта-ций, где мощность ДЭУ совпадает с зафиксированной, другие варианты пока от-кидываются. У оставшихся вариантов анализируется верхняя и нижняя граница суммарных затрат, с учетом этого выбирается шаг между столбцами j , которые обозначают верхнюю возможную границу для затрат в данном столбце. Выбор границ должен осуществляться таким образом, чтобы в последний столбец во-шли все варианты. Далее за каждой строчкой за-крепляется определенный тип ВИЭ:

- 1) СЭУ;
- 2) ВЭУ;
- 3) мини-ГЭС.

Таким образом, выбирается оптимальная комплектация только из тех вариантов, которые используют такие типы ВИЭ, которые лежат выше нашей строки, либо на этой же строке.

Шаг 4. Вход в цикл заполнения таблицы.

Шаг 5. Вход в цикл заполнения ячейки.

Если для данной верхней границы суммарных затрат нет ни одного ва-рианта, использующего только определенный тип ВИЭ – данная ячейка за-полняется нулем, переход к ячейке справа.

Если вариант комплектации, стоящий выше (имеющий точно такую же верхнюю границу, но не использующий тип ВИЭ, закрепленный за строкой ниже) имеет суммарную выработку энергии больше, чем все варианты, под-ходящие под условия на данной ячейке – ячейка заполняется вариантом, сто-ящим над ней.

В противном случае – ячейка заполняется вариантом с самой большой выработкой электроэнергии, среди всех подходящих под условия.

Шаг 6. Если справа есть еще столбцы – переход на следующую ячейку. Возврат на шаг 5.

Если это последняя ячейка в строке:

- 1) Если есть еще строчки – переход на новую строку. Возврат на шаг 5.
- 2) Если это последняя строка – $k + 1$, сохранение результата. Возврат на шаг 2.

Таким образом, алгоритм закончит свое выполнение, когда создаст и заполнит 8 таблиц. В последней строке будут находиться искомые оптимальные варианты для ценовых диапазонов с шагом j , где используются все возможные источники энергии.

3 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРЕКЕРОВ ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ СОЛНЕЧНОГО МОДУЛЯ

В основе принципа работы солнечных панелей лежит явление, когда фотоны обладая импульсом, выбивают электроны на внешней оболочке атомов вещества. Данное явление было открыто в 1887 году Генрихом Герцем и получило название фотоэффекта. После освобождения электрон может как вылететь в окружающую среду или остаться в веществе, перемещаясь от одного атома к другому. Для получения электрического тока необходимо создать направленное движение зарядов, в противном случае движение всех заряженных частиц будет случайным и равновероятным, и суммарный ток будет равен нулю. Как известно, в полупроводниках существует два типа проводимости:

- 1) дырочная проводимость;
- 2) электронная проводимость.

Как понятно из названия, отличаются типы проводимости носителями зарядов, и имеют противоположное друг другу движение тока. Данный факт используется в солнечных электроустановках. При отрыве электрона с внешней орбиты образуется 2 электрических заряда:

- 1) Отрицательный. Носителем является сам электрон.
- 2) Положительный. Носителем является ион, образованный при потере электрона.

Так как, солнечные панели представляют из себя две полупроводниковые пластины разной проводимости, соединенные вместе, то при получении энергии от квантов света, электроны и дырки стремятся рекомбинировать в зоне контакта, создавая запирающий слой. Оставшиеся заряды по разные стороны запирающего слоя создают разницу потенциалов и как следствие напряжение между обкладками. Таким образом, если подключить цепь с нагрузкой между пластинами ток совершит полезную работу, так как заряды будут стремиться рекомбинировать и начнут движение в одну сторону.

Как не трудно догадаться, выработанная электроэнергия напрямую за-

висит от числа выбитых электронов. Число выбитых электронов зависит от интенсивности света. Интенсивность — скалярная физическая величина, количественно характеризующая мощность, переносимую волной в направлении распространения. Численно интенсивность равна усреднённой за период колебаний волны мощности излучения, проходящей через единичную площадку, расположенную перпендикулярно направлению распространения энергии. В математической форме это может быть выражено следующим образом:

$$I(t) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \frac{dP}{dS} dt . \quad (16)$$

Из формулы видно, что, чем меньше площадь dS , тем больше освещённость при той же мощности. Минимальную площадь освещения световые пучки имеют при перпендикулярном расположении относительно солнечной панели. Так, например, при ситуации, указанной на рисунке 16, солнечные панели обращены на юг без продольного наклона.

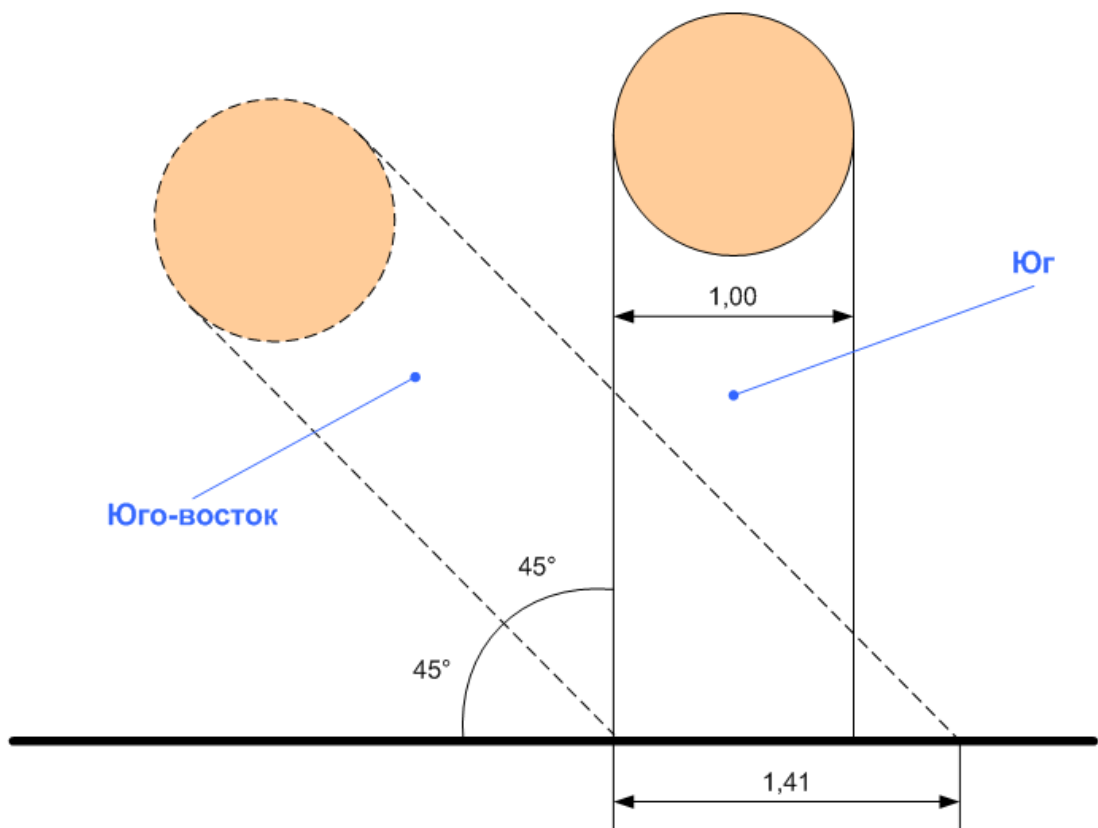


Рисунок 16 – Положение солнца относительно солнечной панели

Солнце, находясь строго на юге, создает с плоскостью солнечной панели перпендикуляр и площадь освещения солнечными лучами составляет $L=1$. Переместившись на восток, Солнце находится на юго-востоке. Тогда солнечные лучи составляют угол 45° и ширина солнечного пучка, падающего на панель, составляет:

$$L = \frac{\tan(90-45)}{\sin(90-45)} = 1,4. \quad (17)$$

Учитывая формулу интенсивности и волновую оптику, интенсивность волны, падающей на площадку, при той же мощности уменьшится до:

$$I = \frac{1}{1.41} * 100 \% = 70 \%. \quad (18)$$

Таким образом, максимальную выработку электроэнергии имеют панели установленные перпендикулярно падающим лучам, при равных остальных показателях. Статичные панели могут терять от 10 % до 30 % в зависимости от географического положения и времени года.

Таким образом, возможной модификацией для повышения КПД солнечного элемента является установка трекера для установочной панели. С её помощью будет обеспечиваться перпендикулярный угол между солнечными лучами и плоскостью панели.

В установках, производимых на данный момент, солнечные панели крепятся на статичную поверхность и не регулируют угол наклона в зависимости от угла падений солнечных лучей. При наличии механизма вращающего солнечную панель относительно движения солнца, таким образом, чтобы угол между плоскостью панели и прямой падения лучей составлял 90° , КПД СЭС повысится от 10 % до 30 %.

Для данных целей используются солнечные трекеры. Принцип работы заключается в снятии значений силы тока в цепи с фоточувствительными эле-

ментами, включенными последовательно. Результаты обрабатываются управляющим устройством и от разницы показаний подается сигнал на поворот площадки, на которой закреплена солнечная панель. К примеру, в одной из такой реализации была использована печатная плата Arduino MEGA, 4 фоторезистора и 2 сервопривода.

Схема сборки установки представлена на рисунке 17.

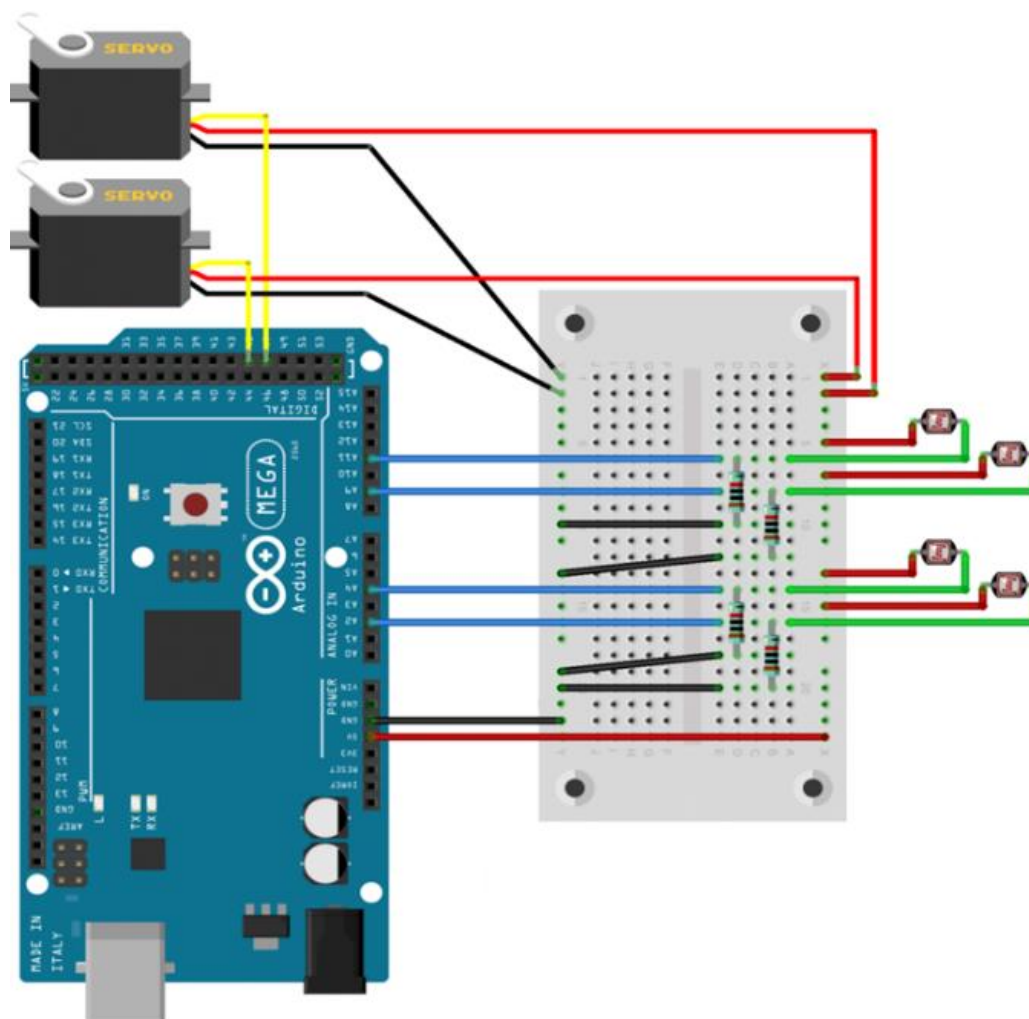


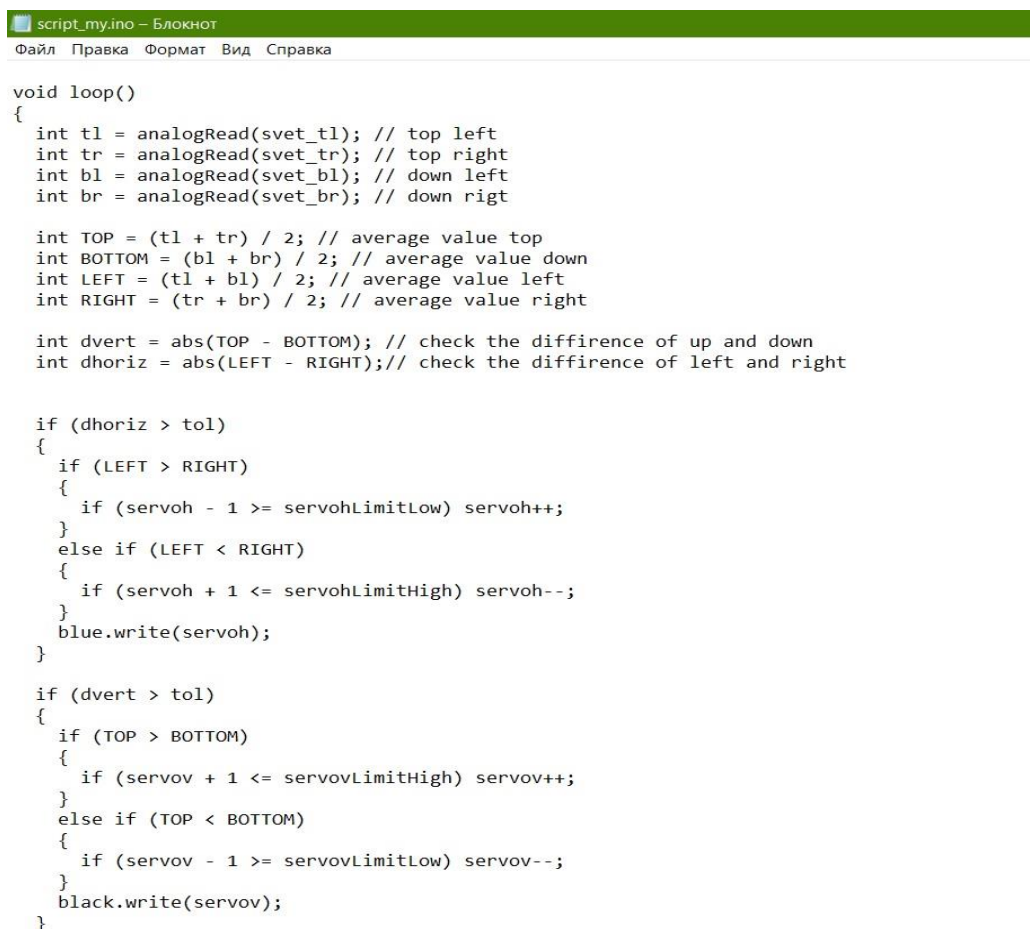
Рисунок 17 – Схема управления солнечным трекером

При сборке данной конструкции, 4 фоторезистора разместились на квадратной площадке в 4 разных углах и были разделены перегородками для отсутствия погрешности при попадании лучей под углом на площадку. С противоположной стороны квадратной площадки устанавливаются солнечные панели. Выводы фоторезисторов были подключены через ограничивающие резисторы к аналоговым входам(пинам) к плате Arduino MEGA. Использо-

ние двух сервоприводов обусловлено необходимостью вращения квадратной площадки с солнечными панелями по двум осям, таким образом обеспечивая прямое попадание света на солнечную панель.

Микропроцессор на плате Arduino MEGA считывает показания тока в цепи каждого фоторезистора, подключенных на отдельные аналоговые входы, и сравнивает показания противоположно установленных фотоэлемента. Каждая пара соответствует определенной оси вращения сервопривода. При изменении разницы тока между цепями противоположных фоторезисторов (что и соответствует изменению освещенности), отдается сигнал сервоприводу на вращение квадратной панели, до тех пор, пока не установится равновесие в противоположных цепях. Таким образом, регулируется поворот панели по двум осям для обеспечения прямого попадания солнечных лучей.

Листинг скрипта для Arduino MEGA представлен на рисунке 18.



```
script_my.ino - Блокнот
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка

void loop()
{
  int t1 = analogRead(svet_t1); // top left
  int tr = analogRead(svet_tr); // top right
  int bl = analogRead(svet_bl); // down left
  int br = analogRead(svet_br); // down right

  int TOP = (t1 + tr) / 2; // average value top
  int BOTTOM = (bl + br) / 2; // average value down
  int LEFT = (t1 + bl) / 2; // average value left
  int RIGHT = (tr + br) / 2; // average value right

  int dvert = abs(TOP - BOTTOM); // check the diffirence of up and down
  int dhoriz = abs(LEFT - RIGHT); // check the diffirence of left and right

  if (dhoriz > tol)
  {
    if (LEFT > RIGHT)
    {
      if (servoh - 1 >= servohLimitLow) servoh++;
    }
    else if (LEFT < RIGHT)
    {
      if (servoh + 1 <= servohLimitHigh) servoh--;
    }
    blue.write(servoh);
  }

  if (dvert > tol)
  {
    if (TOP > BOTTOM)
    {
      if (servov + 1 <= servovLimitHigh) servov++;
    }
    else if (TOP < BOTTOM)
    {
      if (servov - 1 >= servovLimitLow) servov--;
    }
    black.write(servov);
  }
}
```

Рисунок 18 – Листинг скрипта солнечного трекера

4 РАСЧЁТ ДЕГРАДАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА ПРИ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТАНОВКЕ

Использование трекеров позволяет сохранять перпендикулярный угол между солнечным модулем и падающими лучами. Данная установка позволяет повысить количество вырабатываемой энергии на 40 % по сравнению со статичной панелью. Несмотря на данное преимущество, подвижная солнечная панель подвержена большему нагреву, что приведет к ускоренной деградации установки и снижению вырабатываемой мощности.

Деградация солнечных батарей ведет к уменьшению выработки электроэнергии из-за различных физических изменений в структуре самой панели. Деградация панели возникает при повышенной температуре использования солнечного модуля, в том числе температуры окружающих предметов, из-за перепадов дневных и ночных температур эксплуатации панели, повышенной влажности. Эти факторы ведут к постепенному снижению параметров солнечных модулей, включенных последовательно, снижению их КПД, росту стоимости выработки единицы мощности с солнечной панели. Если в малых масштабах изменения незначительны, то в промышленных масштабах деградация солнечных панелей может быть ощутима.

Стандартные вольт-амперные и мощностные характеристики солнечных модулей, указываемые производителем, определяют значения основных энергетических параметров при статичной установке модуля. и не всегда соответствуют внешним условиям, где работает данная солнечная энергоустановка.

Таким образом необходимо произвести расчёты энергетических параметров для динамической установки модуля и падения мощности при повышенном нагреве и проверить целесообразность использования солнечных трекеров.

4.1 Связь температуры солнечного модуля и вольт-амперной характеристики

Солнечная энергия, попадающая на поверхность панели, возбуждает

внешние электроны, которым становится достаточно энергии для «отрыва» от атома и перехода в зону проводимости. Образование пары электрон-дырка и является причиной возникновения появления свободных зарядов. Для того чтобы сделать движение свободных зарядов направленным используют две панели n типа и p типа, которые соприкасаются друг с другом. Так же возможно использовать одну и ту же панель, но с разными зонами легирования доноров и акцепторов. Таким образом, при первом контакте двух зон разноименные заряды рекомбинируют друг с другом и создают запирающий слой. Замыкая цепь через нагрузку заряды будут стремиться рекомбинировать друг с другом и начнут движение по цепи, совершая полезную работу.

Напряжение холостого хода – параметр, заявленный производителем, указывающий напряжение между двумя зонами без подключения нагрузки при температуре 25 °С, что является оптимальной температурой для работы солнечного элемента [8]. Ширина, запрещенной зоны, напрямую влияет на напряжение холостого хода. Уменьшение ширины запрещенной зоны приводит к уменьшению количества энергии необходимой для её преодоления. Таким образом часть электронов станет способна преодолеть барьер, что приведет к снижению разницы потенциалов между двумя зонами легирования.

Кроме падения напряжения холостого хода при нагреве солнечного модуля свыше 25 °С происходит повышение тока короткого замыкания, что благоприятно влияет на выходную мощность ФЭП. Результирующее влияние данных противоположных эффектов будет определяться разностью падения напряжения и повышением тока короткого замыкания. Для примера используем данные заявленные производителем Delta battery для фотоэлектрического модуля Delta SM 100-24М при стандартных условиях проверки. Данные представлены в таблице 1.

Как видно из таблицы, температурный коэффициент по току на порядок отличается от температурного коэффициента по напряжению. Таким образом, результирующий температурный коэффициент мощности составляет:

$$K_P = K_U + K_I = -0,34. \quad (19)$$

Таблица 1 – Характеристики модуля Delta SM 100-24M

Наименование параметра	Обозначение	Величина параметра
Пиковая электрическая мощность	P_{max}	100 Вт
Напряжение в точке максимальной мощности	U_{mp}	18,78 В
Ток в точке максимальной мощности	I_{mp}	5,34 А
Ток короткого замыкания	I_{sc}	5,7 А
Напряжение холостого хода	U_{oc}	22,64 В
Температурный коэффициент по току	K_I	0,04 %/°C
Температурный коэффициент по напряжению	K_U	-0,38 %/°C
Нормальная рабочая температура	T_n	43 °C
КПД ФЭП	η	17,96 %
Размер	Д×Ш×В	1470×670×35 мм
Количество солнечных элементов	(9×4)	36
Коэффициент температурного излучения	ε	0,93

Температурные коэффициенты мощности у других производителей находятся примерно в том же диапазоне. Таблица температурных коэффициентов мощности и КПД, заявленных другими производителями для разных

типов панелей представлена в таблице 2 [8].

Таблица 2 – Температурные коэффициенты и КПД

Модель	Производитель	Тип	КПД, %	β , %/°C
LR6-72PE-360w PERC	Longi Solar	монокристалл	18,60	0,38
HOT VBHN325SJ4	Panasonic	монокристалл	19,70	0,29
PLM-260P-60	Perlight Solar	поликристалл	15,99	0,45
TR660P-275W	Talesun	поликристалл	16,90	0,40
SF165-S	Solar Frontier	тонкопленочный	13,44	0,31

Данные в таблице могут изменяться в зависимости от условий использования. Как видно из таблицы, ТКМ зависит от качества фотоэлектрических преобразователей. Качество ФЭП также определяет степень деградации панелей. Из данных заявленных производителем известно, что монокристаллические панели деградируют быстрее, чем поликристаллические, и за год эксплуатации их мощность снижается на 3 % в сравнении с 2 % у поликристаллов. Обычно это происходит в первые годы эксплуатации, затем деградация составляет соответственно 0,67 % [9]. Поэтому очень важно соблюдать условия эксплуатации солнечных энергоустановок, защищая их от перегрева.

Тип солнечного модуля и его качество определяют температуру нагрева его поверхности. Модули хорошего качества могут работать в диапазоне температур от минус 40 °C до плюс 90 °C, что является хорошим показателем надежности для использования в полевых условиях.

Однако после 15 лет эксплуатации выработка электроэнергии ими может снизиться на 10 %, а после 20 лет – на 20 %. Все солнечные модули по ка-

честву исполнения делятся на категории, представленные в таблице 3.

Таблица 3 – Категории качества солнечных модулей

Обозначение категории	Описание категории
Grand A	Самое высокое качество ФЭП, внешняя целостность, без сколов и микротрещин, высокий КПД и малая степень деградации.
Grand B	Качество хорошее, имеются изменения в цвете, отсутствие сколов и трещин, большая деградация и меньший срок эксплуатации.
Grand C	Наличие сколов и трещин, неоднородный цвет, низкий КПД и низкая стоимость.
Grand D	Самое низкое качество, структура неоднородна, с видимыми дефектами, небольшая надежность и малая стоимость.

Нормальная рабочая температура ячейки обычно составляет от 42 °С до 46 °С и учитывается при определении температуры солнечного элемента во время работы модуля. Обычно предполагается, что разность между температурой окружающей среды линейно зависит от освещенности.

Исходя из вышесказанного следует что ток короткого замыкания при поступлении солнечной радиации [9]:

$$I_{кз} = I_{sc} \times E, \quad (20)$$

где, I_{sc} – значение тока короткого замыкания по характеристикам производителя;

E – средняя освещенность (поступление солнечной радиации) для

рассматриваемой местности.

Для определения температуры солнечного элемента необходимо дополнительно учитывать конвекционный отвод тепла от панели к воздуху:

$$Q_k = a_{\text{из}} \times S_{\text{СЭ}} \times t, \quad (21)$$

где $a_{\text{из}}$ – коэффициент теплоотдачи излучением;

$S_{\text{СЭ}}$ – площадь солнечной панели;

t – исследуемый временной интервал.

Коэффициент теплового излучения выражается формулой:

$$a_{\text{из}} = \varepsilon \times 5,67 \times 10^{-8} \times \frac{(t_{\text{П}}+273,15)^4 - (t_{\text{В}}+273,15)^4}{t_{\text{П}} - t_{\text{В}}}, \quad (22)$$

где ε – степень черноты тела;

$t_{\text{П}}$ – температура поверхности;

$t_{\text{В}}$ – температура воздуха.

Температура солнечного элемента определяется формулой:

$$T_{\text{СЭ}} = T_{\text{ос}} + \frac{E(T_{\text{Н}}-20)}{0,8} - \frac{Q_k}{C \cdot m}, \quad (23)$$

где $T_{\text{ос}}$ – температура окружающей среды;

E – средняя освещенность (поступление солнечной радиации) для рассматриваемой местности;

$T_{\text{Н}}$ – нормальная рабочая температура солнечного элемента;

20 – температура окружающей среды, соответствующая нормальной рабочей температуре;

0,8 – освещенность, при которой солнечный модуль работает в нормальных условиях;

C – удельная теплоемкость кремния;

m – масса солнечной панели.

Зная температуру солнечного элемента получим зависимость напряжения холостого хода от температуры солнечного модуля:

$$U_{xx} = U_{oc} - (0,0034 \times T_{oc}(T_{cэ} - 25)), \quad (24)$$

где U_{oc} – напряжение холостого хода, указанное производителем;

25 – стандартная температура тестирования модуля;

0,0034 – коэффициент учитывающий конвекцию тепла из окружающей среды.

Таким образом, объединяя формулы (22), (23), и (24), получим зависимость выходной мощности от внешних условий:

$$P_{\text{вых}} = I_{sc} \times E \times \left(U_{oc} - \left(0,0034 T_{oc} \times \left(T_{oc} + \frac{E(T_H - 20)}{0,8} - \frac{Q_k}{c \cdot m} - 25 \right) \right) \right). \quad (25)$$

4.2 Расчёт выходной мощности для статичной и подвижной панели

Для расчётов используем кремниевый модуль Delta SM 100-24M. При расчётах используем данные из ЦФО России, город Красноярск.



Рисунок 19 – Продолжительность солнечных суток в России

Как видно из рисунка 19, среднее время солнечных суток в Красноярске составляет около 1800 часов в год или 5 часов в день.

На рисунке 20 показана средняя инсоляция России по регионам. Средняя годовая инсоляция в Красноярске составляет около 4 кВт·ч для плоскости равной 1 м², расположенной перпендикулярно солнечному диску. Площадь расчётного модуля составляет 0,98 м², таким образом за один час модуль будет получать 3920 Вт·ч солнечной энергии. Учитывая принятое среднее время солнечного дня в данной географической точке, равным 5 часам, ФЭП за 1 час будет получать 784 Вт солнечной радиации.



Рисунок 20 – Средняя годовая инсоляция в России

Сохраняя перпендикулярный угол между плоскостью панели и солнечными лучами, ФЭП будет поглощать максимум солнечной радиации. При помощи описанных выше формул произведем расчёты изменения характеристик солнечного элемента. Результаты проведенных расчётов для подвижной панели по каждому часу с учетом убывающего значения мощности представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты расчётов для подвижной панели

$T_{сэ}, ^\circ\text{C}$	I_{sc}, A	$U_{хх}, \text{В}$	$P_{\text{вых}}, \text{Вт}$
25	5,23	18,78	98,22
41	5,23	17,51	91,57
57	5,23	16,35	85,51
72	5,23	15,20	79,49
87	5,24	14,12	73,98

При расчётах использовалась температура окружающей среды 22°C . Так же, стоит учитывать принятое при расчётах допущение о бесконечной теплоемкости воздуха и отсутствии принудительного охлаждения. Принудительное охлаждение имеет большинство солнечных модулей. Как можно заметить, при отсутствии дополнительного охлаждения солнечный элемент нагреется до критических для его работы температур. При нагревании свыше рабочей температуры происходит значительное падение вырабатываемой мощности.

Статичные панели принято устанавливать под оптимальным углом к горизонту. Оптимальное положение панелей представлено на рисунке 21.

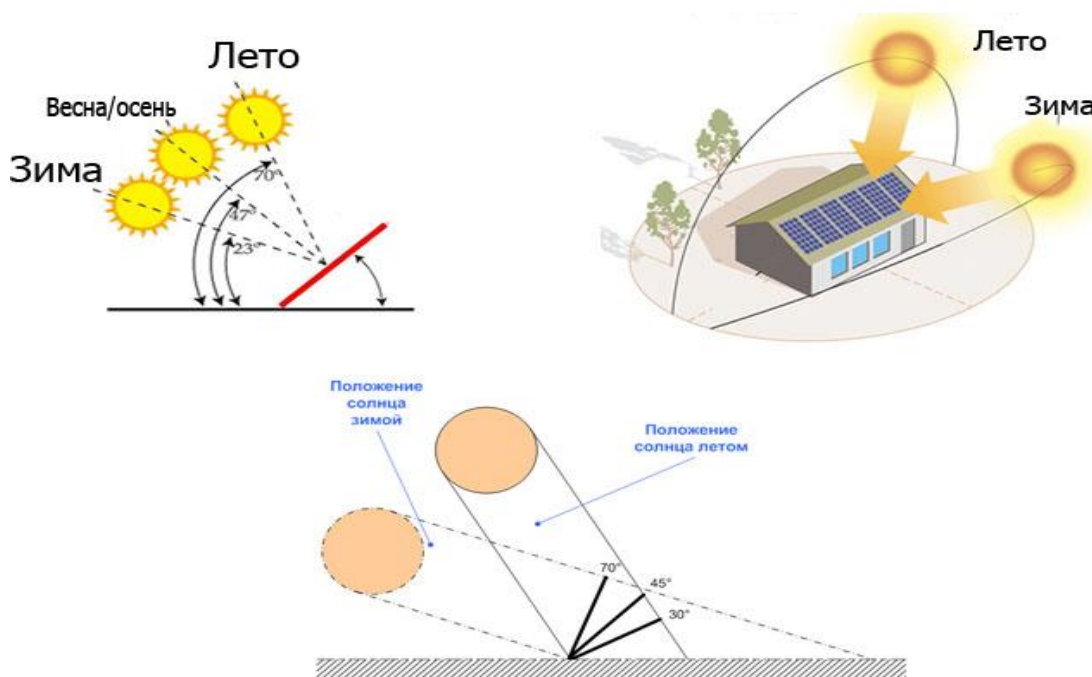


Рисунок 21 – Оптимальное положение солнечных панелей

Как видно из рисунка, оптимальный угол для круглогодичного размещения солнечного модуля является 45° по отношению к горизонту [10]. Таким образом ширина пучка, падающего на плоскость изменится:

$$\cos 45^\circ = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0,7. \quad (26)$$

Так как интенсивность имеет обратную зависимость от ширины пучка, то увлечение ширины пучка в 1,42 раза приведет к падению интенсивности ровно в столько же раз.

Таким образом, солнечная инсоляция, полученная за час, составит:

$$E = \frac{E_{max}}{1.42} = 552, \quad (27)$$

где E_{max} – количество энергии полученной при сохранении прямого угла падения солнечных лучей.

Таким образом, статичная панель получает меньшее количество энергии, чем динамическая, что приведет к уменьшению выходной мощности. Однако, при этом статичный солнечный модуль будет испытывать меньший нагрев, что благоприятно скажется на выходной мощности. Результаты расчётов представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты расчётов для статичной панели

$T_{сэ}, ^\circ\text{C}$	I_{sc}, A	$U_{xx}, \text{В}$	$P_{\text{вых}}, \text{Вт}$
25	3,68	18,78	69,11
35	3,68	18,03	66,35
44	3,68	17,03	62,67
53	3,68	16,65	61,28
62	3,68	16,01	58,92

В отличии от динамической панели в расчётных формулах необходимо учитывать, что солнечный элемент не будет иметь максимальное напряжения холостого хода даже при температуре 25°C . Максимальное напряжение ФЭП

выдает при солнечной инсоляции более чем 800 Вт. Для расчётов использовались такие же допущения и формулы как для динамической панели.

На рисунке 22 представлен график зависимости выходной мощности солнечного элемента в разных условиях в зависимости от температуры. График построен на основании расчётных данных из таблицы 4 и таблицы 5. Как видно из таблицы, несмотря на падение мощности от повышенного нагрева, солнечная панель при динамической установке имеет большую выработку электроэнергии по сравнению со статичной установкой солнечного элемента.

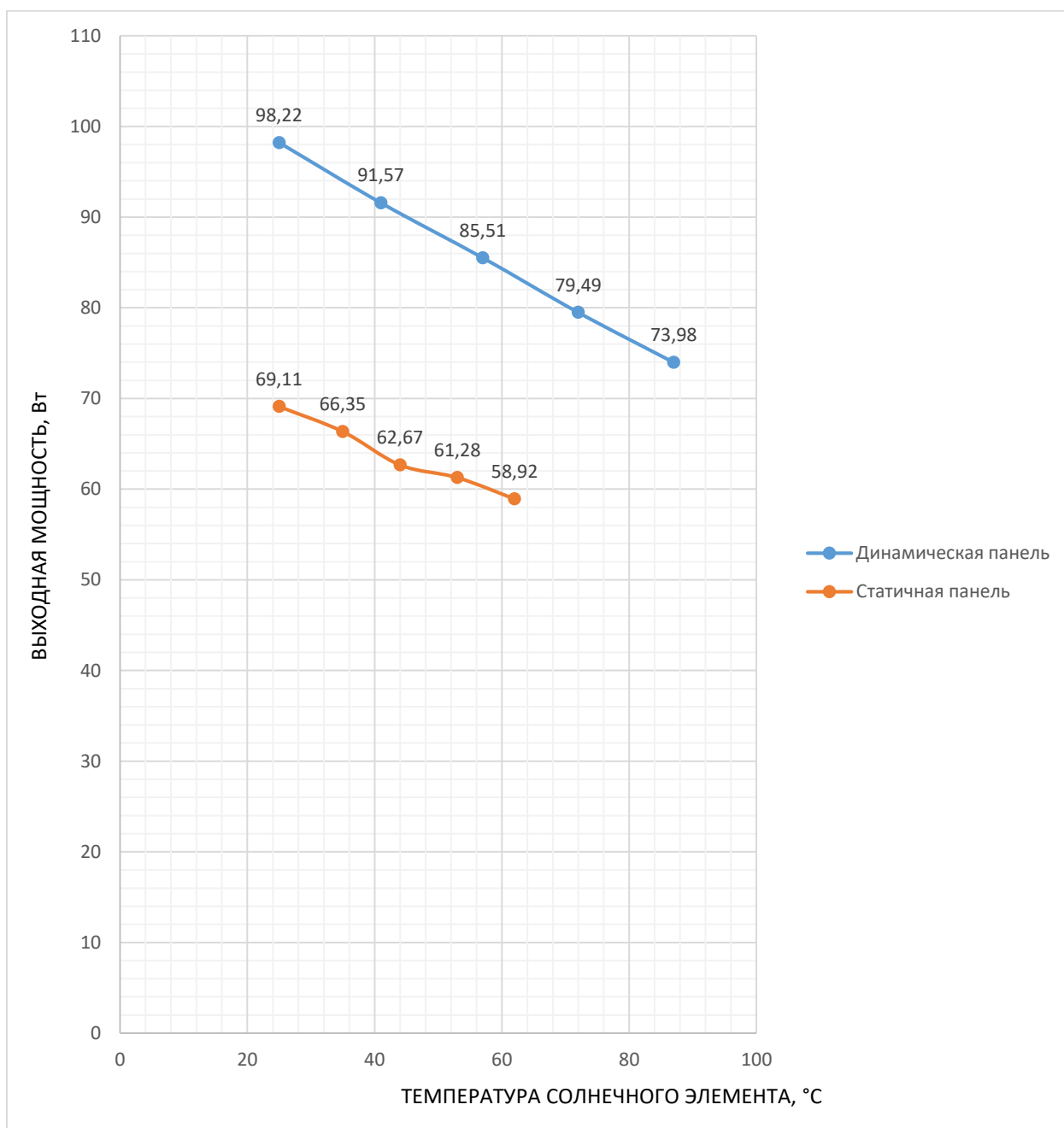


Рисунок 22 – График зависимости выходной мощности от температуры

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения бакалаврской работы при анализе существующих источников энергии было показано, что наибольший потенциал для дальнейшего развития имеют гибридные источники энергии. Была решена проблема автоматизации выбора оптимального состава гибридных источников энергии путем разработки программного обеспечения с графическим интерфейсом. В ходе разработки программного обеспечения был разработан алгоритм, использующий принципы динамического программирования для фильтрации сразу по нескольким переменным.

При обосновании эффективности использования солнечных трекеров, был произведен расчёт выходной мощности для статической и динамической панели с учетом падения мощности, связанное с повышенным нагревом солнечного элемента. В результате можно сделать следующие выводы:

1) Доказано, что наибольший потенциал для дальнейшего развития среди мобильных источников энергии имеют ГИЭ.

2) Показано, что разработанное программное обеспечение позволяет автоматизировать выбор оптимального состава гибридного источника энергии для конкретной географической точки.

3) Рассчитано математическим путем, что использование трекера для поворота солнечной панели позволяет повысить выработку электроэнергии на 42 %.

4) Установлено, что несмотря на падение мощности, связанное с повышенным нагревом панели, при динамической установке солнечные элементы имеют большие значения выработки электроэнергии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Общая энергетика: развитие топочных технологий. В 2 ч. Часть 2 : учеб. пособие / В. Л. Шульман [и др.] ; под научной редакцией Б. В. Берга. — М. : Изд-во Юрайт, 2022. — 209 с.

2 Савельев, И. В. Курс общей физики. В 3 т. Том 2. Электричество и магнетизм : учеб. пособие / И. В. Савельев. — М. : Наука, 1988. — 497 с.

3 Николаев, В. В. Методика выбора оптимального состава и типоразмера гибридных энергетических комплексов на базе дизельных энергетических установок / Н. Н. Николаев, О. С. Викторчук // Инновации в сельском хозяйстве. — 2016. — Вып. 16 : — С. 151–155.

4 Мартынов, Н. П. Методика определения рациональной номенклатуры источников электрической энергии межвидового назначения для обеспечения воинских формирований Вооруженных Сил Российской Федерации / Н. П. Мартынов // Министерство обороны Российской Федерации. — 2018. — Вып. 32: — С. 13–17.

5 Финогенов, О. А. Динамическое программирование: основные идеи и их применение в рекурсии / О.А. Финогенов, И.Б. Ларина // Современные информационно-коммуникационные технологии. — 2022. — № 13. — С. 51-62.

6 Пат. 2015663555 Российская Федерация, МПК G05B 13/00, G05B 13/02. Численное решение задачи динамического программирования [Текст] / Е. Л. Слабнов, В. Д.; Казан. инст. упр. и права — № 2015619348; Заявл. 06.10.2015 ; Оpubл. 24.12.2015, Бюл. № 13.

7 Бойцов, Д. И. Алгоритм формосохраняющего динамического программирования для решения задач с конечным горизонтом времени / Д. И. Бойцов, С. С. Сидоров // Компьютерные науки и информационные технологии.— 2014. — Вып. 14: Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского. — С. 59–65.

8 Кирпичникова, И. М. Построение энергетических характеристик солнечных модулей с учетом условий окружающей среды / И. М. Кирпичникова, И. Б. Махсумов // Вестник пермского национального исследовательского политехнического университета. – 2020. – Вып. 34 : Электротех., инф. тех., сис.упр. – С. 56–74.

9 Пазушкина, О. В. Методы проверки солнечных электростанций в полевых условиях / О. В. Пазушкина // II Всероссийская научно-техническая конференция : сб. науч. тр. / Ульянов. гос. тех. ун-т, – Ульяновск, 2022. – С. 63–66.

10 Сорогин, А. С. Деграция солнечных панелей / А. С. Сорогин // XIX Всероссийской научно-практической конференции : сб. науч. тр. / Омск. гос. тех. ун-т, – Омск, 2021. – С. 131–135.